

ผลของโคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโตนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

นายธนพล ว่องวานิช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CHITOSAN ON FLOTATION DEINKING EFFICIENCY OF TONER INK

MR. TANAPON WONGWANICH

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของโคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโตนเนอร์
ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

โดย

นายธนพล ว่องวานิช

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. กุณทีนี สุวรรณกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สิริวรรณ พัฒนาคดี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์)

ธนพล ว่องวาณิช : ผลของไคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ. (EFFECTS OF CHITOSAN ON FLOTATION DEINKING EFFICIENCY OF TONER INK). อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี, 80 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของไคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามี 2 ตัวแปร โดยตัวแปรแรก คือ ชนิดของไคโทซานซึ่งจำแนกโดยใช้น้ำหนักโมเลกุล และมี 3 ระดับดังนี้ คือ ไคโทซานชนิดที่ 1 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 32,000 ดอลตัน ไคโทซานชนิดที่ 2 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 21,000 ดอลตัน และไคโทซานชนิดที่ 3 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 6,500 ดอลตัน ตัวแปรที่สอง คือ ปริมาณไคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ โดยงานวิจัยนี้จะมีการใช้ปริมาณไคโทซานร้อยละ 0.1 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากการทดลองพบว่า น้ำหนักโมเลกุลของไคโทซานที่ใช้ไม่มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสมบัติเชิงแสงและสมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบที่ได้จากกรณีหลังการลอยฟองอากาศ (P-value มากกว่า 0.05) ในขณะที่ปริมาณไคโทซานที่เติมลงไป ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อแล้วผ่านเข้าสู่กระบวนการลอยฟองอากาศนั้น มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสมบัติเชิงแสงและสมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบที่ได้จากกรณีหลังการลอยฟองอากาศ (P-value น้อยกว่า 0.05) ดังนี้คือ ค่าความขาวสว่าง ค่าความทึบแสง ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ และดัชนีความต้านทานแรงฉีก แต่ไม่มีผลกระทบต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ค่าสภาพระบายน้ำได้ และค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ เมื่อใช้ปริมาณไคโทซานมากขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวสว่างลดลง ในขณะที่ค่าความทึบแสงและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าปริมาณไคโทซานที่มากเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศลดลง เนื่องจากทำให้เกิดกลุ่มอนุภาคของหมึกที่มีขนาดใหญ่มากเกินไป นอกจากนี้ยังอาจเป็นไปได้ว่าไคโทซานไปจับกับเส้นใยมากกว่าอนุภาคหมึก เนื่องจากไคโทซานมีความเป็นประจุบวก ในขณะที่เส้นใยมีความเป็นประจุลบ จึงอาจทำให้ไคโทซานเหลือโอกาสในการไปจับอนุภาคหมึกน้อยลง อนุภาคหมึกจึงหลงเหลืออยู่ในเยื่อมาก ในขณะที่การใช้ปริมาณไคโทซานสูงทำให้ดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะไคโทซานเป็นสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ

สาขาวิชา ...เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ...ลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา 2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5172306423 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : FLOTATION DEINKING / CHITOSAN / BRIGHTNESS / EFFECTIVE RESIDUAL INK CONCENTRATION.

TANAPON WONGWANICH : EFFECTS OF CHITOSAN ON FLOTATION DEINKING EFFICIENCY OF TONER INK. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NATTAYA PONGSTABODEE, Ph.D, 80 pp.

The objective of this research was to investigate the effects of chitosan on flotation deinking efficiency of toner ink. Two factors studied were studied. The first factor was types of chitosan with three different molecular weights i.e. 1st chitosan with molecular weight of 32,000 Dalton, 2nd chitosan with molecular weight of 6,500 Dalton, and 3rd chitosan with molecular weight of 21,000 Dalton. The second factor was the dosage of chitosan which was 0.1% and 1.0% based on oven dried (O.D.) pulp weight. The experimental results indicated that molecular weight of chitosan had no statistically significant effect on optical and physical properties of handsheets prepared after flotation (P-value was higher than 0.05). However, the dosage of chitosan had a statistically significant effect on brightness, opacity, effective residual ink concentration (ERIC) and tear index (P-value was lower than 0.05) while it had no statistically significant effect on tensile index, burst index, freeness and apparent density. Higher dosage of chitosan resulted in lower brightness, higher opacity and higher ERIC possibly because too much chitosan reduced flotation deinking efficiency due to too large ink particles agglomerated by chitosan. Also, it might be because chitosan might react with pulp fibers more than ink particles due to the positive charge of chitosan and negative charge of pulp fiber. Thus, the chance of chitosan to collect ink particles might be decreased and more ink particles were left in the pulp. Higher dosage of chitosan also led to higher tear index since chitosan itself was a strength agent for paper.

Field of Study : Pulp and Paper Technology

Student's Signature

Academic Year : 2009

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยผลการดูแลเอาใจใส่และให้คำปรึกษาอย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ ประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้ระหว่างการทำวิทยานิพนธ์และความเมตตาที่ได้รับ ทำให้ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิชาการ อาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ ที่ให้การดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ ตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษา รวมถึงชี้แนะแนวทางวิธีการทำวิจัย และการพัฒนาโครงร่างวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการวิพากษ์วิจารณ์และแนะนำหนังสือเอกสารวิชาการให้ผู้วิจัยศึกษา จนทำให้ผู้วิจัยสามารถพัฒนาหัวข้อวิจัยได้สำเร็จทันเวลาและดำเนินการได้จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณท่านประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. กุณทีนิ สุวรรณกิจ อาจารย์ ดร. สิริวรรณ พัฒนาฤดี และ อาจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ ที่ให้คำชี้แนะแนวทางการปรับปรุงตั้งแต่ช่วงสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์และการสอบปากเปล่า จนทำให้รายงานวิทยานิพนธ์สำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้จนสำเร็จได้ในวันนี้

ขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะการเก็บข้อมูล พี่อ๋ม (วราพงษ์) พี่อ้น (พิมลแข) อ้อม (ทิพวรรณ) และบุคคลอื่นๆ อีกมากมายที่ไม่ได้เอ่ยนาม

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมศักดิ์ และคุณแม่กาญจนา ว่องวาณิช คุณป้า สุวิมล ว่องวาณิช รวมทั้ง คุณปู่ คุณย่า อากง อาม่า คุณลุง คุณป้า คุณอา คุณน้า น้องๆ และทุกๆ คนที่ให้กำลังใจในการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ (deinking process).....	4
2.2 เคมีของการลอยฟองอากาศ (flotation chemistry).....	12
2.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึก (deinking chemicals).....	14
2.4 หมึกพิมพ์โทนเนอร์ (toner).....	20
2.5 ไคตินและไคโทซาน (chitin and chitosan).....	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.2 วิธีการทดลอง.....	35
3.2.1 การทดลองควบคุม.....	36
3.2.2 การทดลองที่ใส่ไคโทซาน.....	37
3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงพร้อมทั้งการวิเคราะห์ ข้อมูล.....	37
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4.1 สภาพระบายน้ำได้ (Freeness).....	42

4.2 ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ (Apparent density).....	45
4.3 ความขาวสว่าง (Brightness).....	47
4.4 ความทึบแสง (Opacity).....	51
4.5 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC).....	54
4.6 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index).....	58
4.7 ดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก (Tear index).....	60
4.8 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst index).....	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย.....	68
รายการอ้างอิง	69
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	72
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบของผลการทดลอง.....	75
ภาคผนวก ค รูปเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	80

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ปริมาณไคทินที่พบในสิ่งมีชีวิตต่างๆ	21
2-2	ความสามารถของการละลายไคโทซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่มีความเข้มข้นของกรดแตกต่างกัน	26
3-1	ข้อมูลของไคโทซาน 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง	34
3-2	อัตราความเร็วรอบและระยะเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเชื้อ	36
3-3	การออกแบบแพกทอเรียลสองระดับ สองตัวแปร	41
4-1	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าสภาพ ระบายน้ำของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ	44
4-2	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสภาพระบายน้ำหลังการลอยฟอง อากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุม	44
4-3	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของน้ำหนักโมเลกุลของไคโทซานต่อค่า ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ	46
4-4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลัง การลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการ ทดลองควบคุม	47
4-5	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าความขาว สว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ	49
4-6	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟอง อากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุม	50
4-7	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าความทึบ แสงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ	53
4-8	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความทึบแสงหลังการลอยฟองอากาศ ที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุม	54
4-9	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าปริมาณ หมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ	56

4-10	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุม.....	57
4-11	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุม.....	60
4-12	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ.....	62
4-13	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุม.....	63
4-14	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ.....	65
4-15	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุม.....	66

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	เครื่องตีกระจายเยื่อ.....	5
2-2	เครื่องตีกระจายกลุ่มเยื่อให้เป็นเส้นใยเดี่ยว.....	5
2-3	เครื่องกรองเยื่อ.....	6
2-4	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง.....	7
2-5	การกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ.....	8
2-6	การกำจัดหมึกด้วยวิธีการล้าง.....	9
2-7	เครื่องกำจัดน้ำออกและหลักการการทำงานของเครื่อง.....	10
2-8	เครื่องกระจายแบบ disk disperger.....	10
2-9	เครื่องกระจายแบบ kneading disperger.....	11
2-10	ลักษณะพื้นบดของจานบดในเครื่องบดเยื่อแบบความเข้มข้นต่ำ.....	11
2-11	ลักษณะพื้นบดของจานบดในเครื่องบดเยื่อแบบความเข้มข้นสูง.....	12
2-12	รูปแบบการสัมผัสระหว่างอนุภาคของหมึกและฟองอากาศ.....	13
2-13	โครงสร้างของ DTPA และ EDTA.....	16
2-14	ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	18
2-15	Micelle.....	19
2-16	สูตรโครงสร้างของไคติน.....	21
2-17	สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส.....	21
2-18	สูตรโครงสร้างของไคโทซาน.....	22
2-19	ขั้นตอนการเตรียมไคติน.....	23
2-20	ขั้นตอนการเตรียมไคโทซาน.....	25
3-1	ตัวอย่างภาพพิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์บนกระดาษขนาด A-4 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	33
3-2	เครื่องวัดค่าสภาพระบายน้ำ (freeness tester).....	38
3-3	เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (optical tester).....	38
3-4	เครื่องวัดค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile tester).....	39
3-5	เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (tear tester).....	40
3-6	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst tester).....	40

4-1	ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อค่าสภาพละลายของเยื่อก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ.....	42
4-2	ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ ก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	45
4-3	ผลของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อความขาวสว่างของ แผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	47
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอย ฟองอากาศกับปริมาณไคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ.....	49
4-5	ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ.....	51
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบหลังการลอย ฟองอากาศกับปริมาณไคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ.....	53
4-7	ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่น ทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	55
4-8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในแผ่นทดสอบหลังการลอย ฟองอากาศกับปริมาณของไคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ.....	57
4-9	ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	58
4-10	ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	60
4-11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการ ลอยฟองอากาศกับปริมาณของไคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ...	62
4-12	ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์ในปัจจุบัน ทำให้เครื่องพิมพ์หมึกโทนเนอร์มีราคาถูกลง เครื่องพิมพ์โทนเนอร์จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในครัวเรือนและภาคธุรกิจ ส่งผลให้ปริมาณกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์มีมากขึ้น ในการรีไซเคิลกระดาษนั้น การกำจัดหมึกโทนเนอร์ซึ่งอนุภาคของหมึกมีขนาดใหญ่สามารถทำได้หลายวิธี โดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดหมึกโทนเนอร์ คือ การลอยฟองอากาศ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการกำจัดหมึกโทนเนอร์ออกจากกระดาษด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้หากมีการนำเซลล์และ/หรือโคโทซานมาใช้ร่วมด้วย ทั้งนี้เนื่องจากโคโทซานสามารถทำหน้าที่เป็นสารรวบรวม (collector) อนุภาคของหมึก จึงช่วยในการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวในส่วนที่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับโคโทซานนั้น ยังมีการศึกษาครอบคลุมถึงตัวแปรที่ไม่กว้างมากนัก ในขณะที่งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เอนไซม์มาช่วยในการดึงหมึกออกนั้นมีการศึกษามากมายอยู่ทั่วไป ฉะนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงผลของโคโทซาน โดยเฉพาะปริมาณที่ใช้และน้ำหนักโมเลกุลของโคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเป็นสำคัญ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาถึงผลของโคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการทดลองกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์โดยใช้โคโทซาน ซึ่งตัวแปรที่จะศึกษา คือ น้ำหนักโมเลกุลของโคโทซาน และ ปริมาณของโคโทซานที่ใช้ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมของโคโทซาน

2. ทดสอบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้ทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยวิเคราะห์ค่าสภาพระบายน้ำ (freeness) ของเยื่อ ค่าความขาวสว่าง (brightness) ของกระดาษ ค่าความทึบแสง (opacity) ของกระดาษ ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration-ERIC) ของกระดาษ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ของกระดาษ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ของกระดาษ ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ของกระดาษ และค่าความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ของกระดาษ

1.4 นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในการวิจัย

โคโทซาน คือ โคทินในรูปที่มีปริมาณหมู่แอซีทิล (acetyl-COCH_3) ต่ำ โดยเกิดจากปฏิกิริยากากำจัดหมู่แอซีทิล (deacetylation) ของโคทินด้วยด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนไปโดยหมู่อะซิตามิโด ($\text{acetamido-NHCOCH}_3$) เปลี่ยนไปเป็นหมู่อะมิโน (amino-NH_2) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สอง

หมึกพิมพ์โทนเนอร์ คือ หมึกที่ประกอบด้วย สารสี (pigment) และเรซิน (resin) ที่ทำหน้าที่เป็นสารยึด รวมถึงสารอื่นๆ เช่น สารเติมแต่งควบคุมประจุ (charge control additive) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมระดับของประจุที่ก่อให้เกิดภาพ สารเติมแต่งเพื่อให้โทนเนอร์ไหลได้ดีขึ้น สารเติมแต่งสมบัติแม่เหล็ก

การลอยฟองอากาศ คือ การทำให้อนุภาคหมึกไปเกาะติดกับฟองอากาศ แล้วลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกไป

ค่าสภาพระบายน้ำ คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการระบายน้ำออกของเยื่อ โดยหากค่าสภาพระบายน้ำมีค่าสูง เยื่อจะอุ้มน้ำได้น้อย และสามารถระบายน้ำออกมาได้มาก

ความขาวสว่าง คือ ร้อยละการสะท้อนแสงของวัตถุในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 457 นาโนเมตร โดยค่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสะอาดของเยื่อ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า เยื่อมีความสะอาดสูงและมีปริมาณหมึกที่เหลืออยู่น้อย

ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ หากมีค่ามากแสดงว่ามีปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อมาก

ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษที่นำมาทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูง แสดงว่า กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง จึงต้องใช้แรงดึงสูง โดยที่ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น Nm/g

ดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก คือ การวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวเริ่มต้น โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่ใช้ทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า กระดาษมีความต้านทานแรงฉีกสูง จึงต้องใช้แรงในการฉีกสูง ดัชนีความต้านทานแรงฉีกมีหน่วยเป็น mN m²/g

ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ คือ การวัดความต้านทานต่อแรงที่กระทำกับพื้นที่ของกระดาษในแนวตั้งฉากก่อนที่กระดาษจะเกิดการขาดทะลุ โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่ใช้ทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่ากระดาษมีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูง จึงต้องใช้แรงในการดันทะลุสูง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีหน่วยเป็น kPa m²/g

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. การวิจัยนี้ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับผลของไคโทซานที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมักโตนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ซึ่งจะช่วยให้เกิดองค์ความรู้ที่ต่อยอดจากการวิจัยก่อนหน้านี้ในการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการกำจัดหมักออกจากกระดาษใช้แล้ว ข้อค้นพบจากการวิจัยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการรักษาสิ่งแวดล้อมโลก โดยเฉพาะการนำวัสดุใช้แล้วเวียนกลับมาใช้อีก

2. การวิจัยนี้จะเป็นการสร้างองค์ความรู้ที่นำไปสู่การพัฒนาศาสตร์ของเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

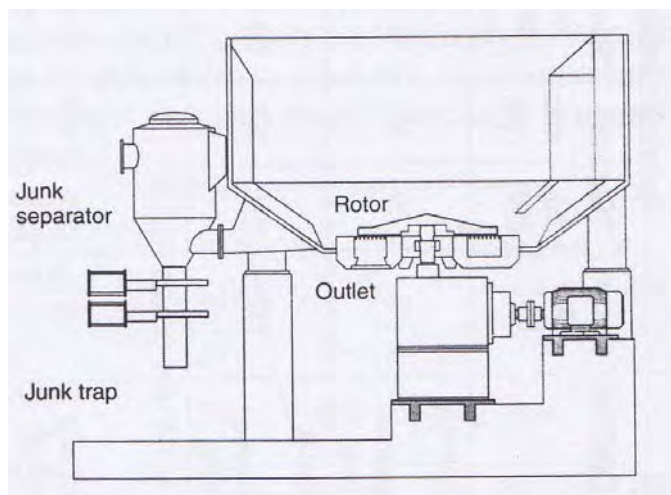
สาระที่นำเสนอในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับแนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ เคมีของการลอยฟองอากาศ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึก หมึกพิมพ์โทนเนอร์ ไคทินและไคโทซาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1. กระบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ (deinking process)

ปัจจุบันการบริโภคกระดาษพิมพ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น การตระหนักถึงความสำคัญของปัญหาสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ทำให้การเวียนนำกระดาษกลับมาใช้ใหม่กลายเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้อีกต่อไป และเพื่อให้มูลค่าของกระดาษนั้นสูงขึ้น กระดาษที่ผ่านงานพิมพ์มาแล้วควรมีการกำจัดหมึกออกก่อนที่จะถูกเวียนนำกลับไปผลิตเป็นเยื่อและกระดาษใหม่ (waste paper recycling) กระบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษโดยทั่วไปแล้วประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

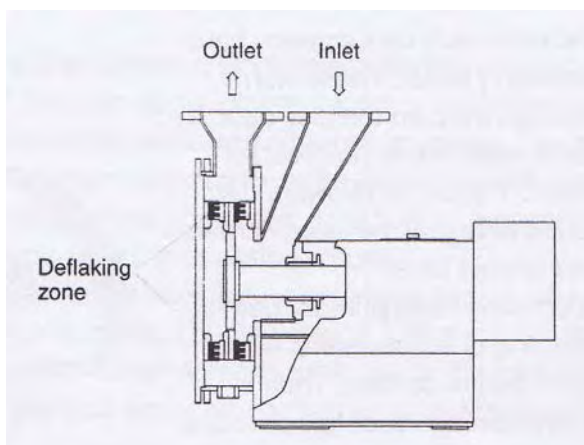
2.1.1. การตีกระจายเยื่อ (pulping or repulping)

กระดาษที่จะเวียนนำกลับมาผลิตเป็นเยื่อและกระดาษใหม่นั้นจะถูกบ่อนสูลู่เครื่องตีกระจายเยื่อ ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ซึ่งเป็นการทำให้กระดาษแตกตัวออกมาเป็นเส้นใย ทำให้ออนุภาคหมึกหลุดออกจากเส้นใย และยังเป็นการทำจัดสิ่งแปลกปลอมจำพวกกาวเหนียวและพอยล์ให้ออกจากเส้นใยด้วย ความเข้มข้นของเยื่อ (consistency) ที่นิยมใช้ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อมีค่าประมาณร้อยละ 4-6 อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของเยื่อสูงขึ้น จะไปช่วยลดปริมาณสารเคมีที่ใช้และทำให้ออนุภาคหมึกหลุดออกจากเส้นใยได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานในระบบเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อนี้ส่วนใหญ่จะมีการเติมสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดหมึก ออกลงไปด้วย โดยสารเคมีที่นิยมใช้ คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สารลดแรงตึงผิว (surfactant) และ สารจับโลหะหนัก (chelating agent) เป็นต้น



รูปที่ 2-1 เครื่องตีกระจายเยื่อ [1]

2.1.2 การตีกระจายกลุ่มเยื่อให้เป็นเส้นใยเดี่ยว (deflaking)

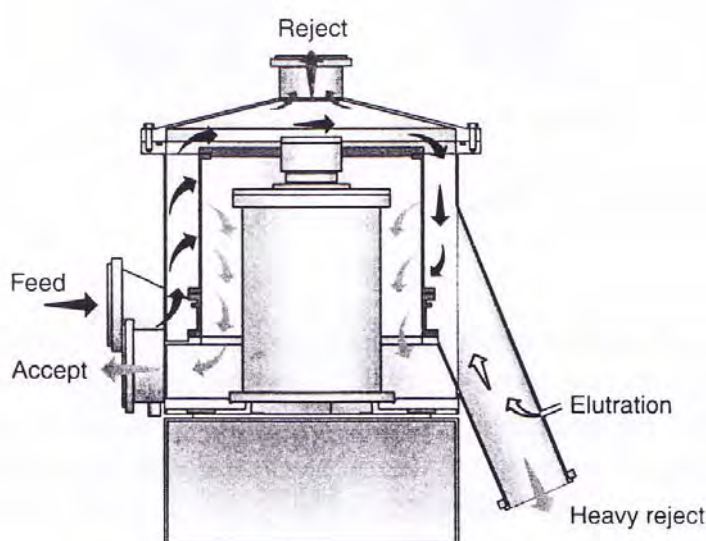


รูปที่ 2-2 เครื่องตีกระจายกลุ่มเยื่อให้เป็นเส้นใยเดี่ยว [1]

การตีกระจายกลุ่มกระดาษของเยื่อให้เป็นเส้นใยเดี่ยวกระทำผ่านเครื่องตีกระจายกลุ่มเยื่อ ดังแสดงในรูปที่ 2-2 การตีกระจายเยื่อในขั้นตอนนี้เป็นการทำงานให้กลุ่มเยื่อแยกตัวออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ และเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ให้มากที่สุด ขั้นตอนนี้เหมาะกับกระดาษที่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงขณะเปียก (wet strength agent) เครื่องตีกระจายกลุ่มเยื่อให้เป็นเส้นใยเดี่ยวส่วนมากจะใช้ต่อจากเครื่องตีกระจายเยื่อ ทั้งนี้เนื่องจากหากมีการใช้เครื่องตีกระจายเยื่ออย่างต่อเนื่องเพียงอย่างเดียวทำให้ต้องใช้พลังงานมาก จึงต้องมีการใช้เครื่องตีกระจายกลุ่มเยื่อให้เป็นเส้นใยเดี่ยวมา

2.1.3 การกรองเยื่อ (screening)

การกรองเยื่อจะดำเนินการผ่านเครื่องกรองเยื่อ (screen) ดังแสดงในรูปที่ 2-3 การกรองเยื่อเป็นการกำจัดเอาสิ่งแปลกปลอม เช่น คลิปหนีบกระดาษ เส้นลวดเย็บกระดาษ เป็นต้น ออกจากเส้นใยก่อนที่จะหลุดติดไปพร้อมกับเส้นใย และเนื่องจากการกรองเยื่อยิ่งทำมากเท่าไร ยิ่งทำให้มีโอกาสสูญเสียเส้นใยมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการสูญเสียเส้นใย ส่วนใหญ่แล้วมักจะนำส่วนที่ถูกกำจัด (reject) จากการกรองเยื่อมาผ่านการกรองเยื่ออีกครั้ง โดยทั่วไปแล้ววิธีการกรองเยื่อจะแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ



รูปที่ 2-3 เครื่องกรองเยื่อ [1]

2.1.3.1 การกรองเยื่อแบบหยาบ (coarse screening)

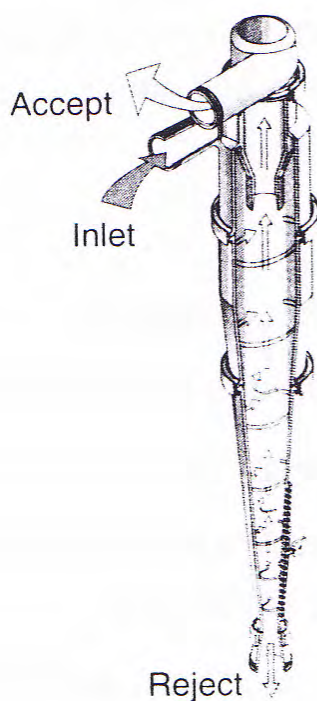
การกรองเยื่อแบบหยาบจะมีทั้งชนิด disk screen และชนิด cylindrical screen โดยทั้ง 2 ชนิดนี้ทำงานภายใต้แรงดัน โดยชนิด disk screen เหมาะกับเยื่อที่มีสิ่งแปลกปลอมปนอยู่มาก เนื่องจากจะช่วยย่อยเส้นใยได้ดีและช่วยให้เยื่อมีความสะอาดมากขึ้น สำหรับการกรองเยื่อแบบหยาบนั้นส่วนมากจะใช้กับเยื่อที่มีความเข้มข้นปานกลาง

2.1.3.2 การกรองเยื่อแบบละเอียด (fine screening)

การกรองเยื่อแบบละเอียดเหมาะที่จะใช้กับกระดาษพิมพ์เขียน โดยการกรองเยื่อแบบละเอียดจะทำหลังจากการกรองเยื่อแบบหยาบ ซึ่งส่วนใหญ่การกรองเยื่อแบบละเอียดจะใช้กับเยื่อที่มีความเข้มข้นของเยื่อต่ำ

2.1.4 การทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal cleaning)

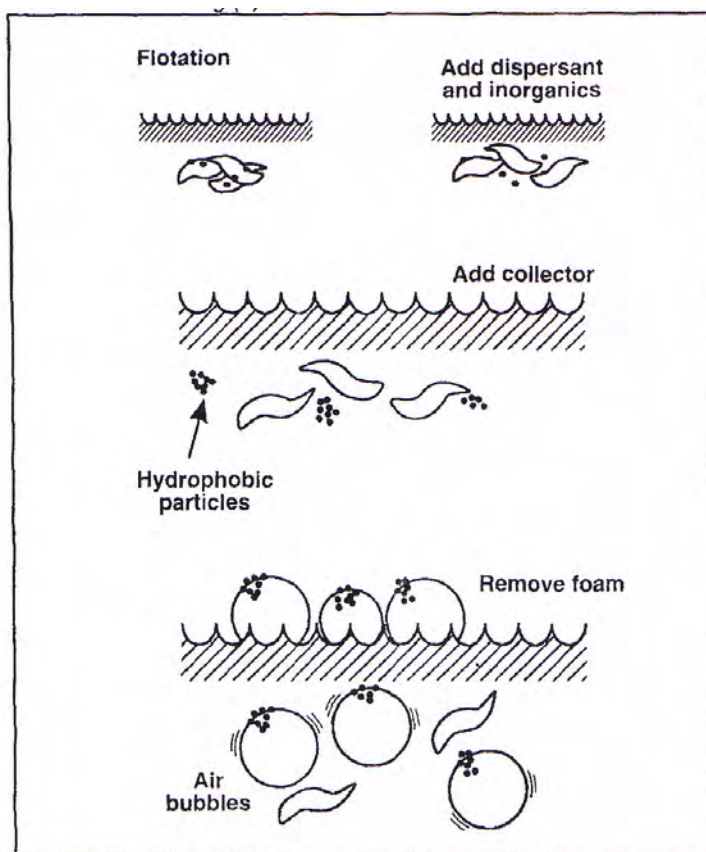
การทำความสะอาดเยื่อโดยอาศัยเครื่องทำความสะอาดแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal cleaner) ดังแสดงในรูปที่ 2-4 เป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่การกรองเยื่อไม่สามารถกำจัดได้ ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของเยื่อและสิ่งแปลกปลอมโดยจะเปรียบเทียบกับของน้ำ โดยทั่วแล้วการทำความสะอาดเยื่อแบบนี้จะแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การทำความสะอาดเยื่อแบบ forward cleaning จะเหมาะกับการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเล็ก ที่มีความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นสูงกว่าน้ำ เช่น ทราชัย ชิ้นส่วนโลหะ แก้ว เป็นต้น การทำความสะอาดเยื่อแบบ reverse cleaning จะเหมาะกับการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเล็กที่มีความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ เช่น พลาสติก โฟม เป็นต้น



รูปที่ 2-4 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง [1]

2.1.5 การกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (flotation deinking or flotation)

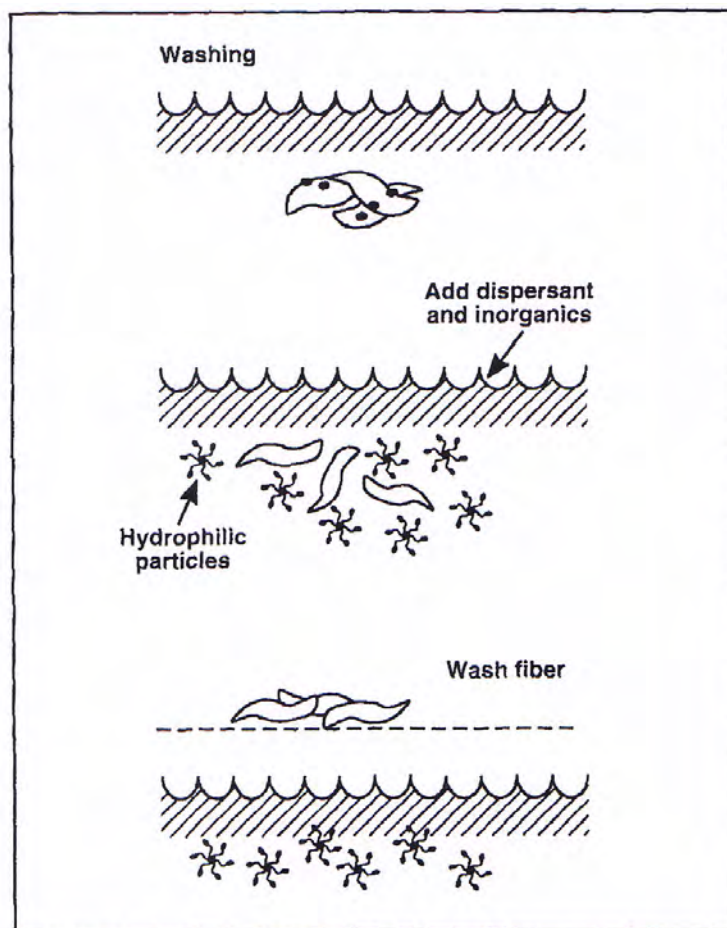
การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเป็นวิธีการกำจัดหมึกพิมพ์ที่นิยมใช้กันมาก ทั้งนี้เนื่องจากการใช้น้ำในปริมาณที่น้อยกว่าวิธีการล้าง วิธีการกำจัดหมึกแบบนี้เหมาะสำหรับอนุภาคหมึกพิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 10-100 ไมโครเมตร เช่น หมึกโทนเนอร์ หมึกที่แห้งตัวด้วยรังสียูวี เป็นต้น โดยวิธีนี้จะมีการใช้สารเคมีที่เรียกว่าสารรวบรวม (collector) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ประเภทหนึ่ง โดยสารรวบรวมจะช่วยทำให้อนุภาคหมึกพิมพ์มารวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (agglomeration) และมีสภาพไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งกลุ่มอนุภาคหมึกพิมพ์นี้จะไปเกาะติดกับฟองอากาศเพื่อลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ (flotation cell) และถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 การกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ [2]

2.1.6 การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้าง (washing)

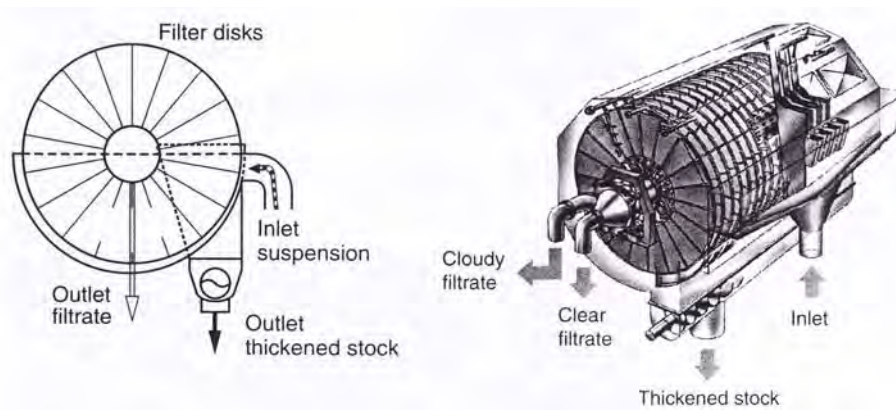
การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้างเป็นขั้นตอนการกรองโดยใช้น้ำในการพาเอาอนุภาคของหมึกพิมพ์ออกมาพร้อมกับน้ำ วิธีการกำจัดหมึกแบบนี้เหมาะสำหรับหมึกพิมพ์ที่มี



รูปที่ 2-6 การกำจัดหมึกด้วยวิธีการล้าง [2]

2.1.7 การกำจัดน้ำออก (dewatering)

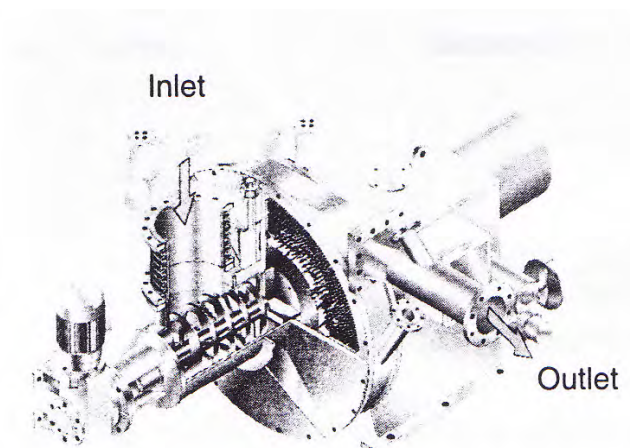
การกำจัดน้ำออกเป็นกระบวนการดึงน้ำออกจากน้ำเยื่อเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเยื่อ ซึ่งเป็นกระบวนการกรองด้วยการกดอัดเชิงกล โดยในระหว่างการกรองอาจเกิดแผ่นเยื่อที่เรียกว่า filter cake หรือ filter mat สะสมอยู่เป็นชั้นๆ บนแผ่นกรอง ดังแสดงในรูปที่ 2-7 ข้อดีหรือประโยชน์ของการกำจัดน้ำออก คือ ช่วยประหยัดพลังงานในการทำกระดาษให้แห้ง ประหยัดต้นทุนในการขนส่งหรือการเก็บรักษาเยื่อ และเป็นการแยกน้ำที่มีสารเคมีปนเพื่อนำน้ำที่ได้ไปเวียนกลับใช้ใหม่



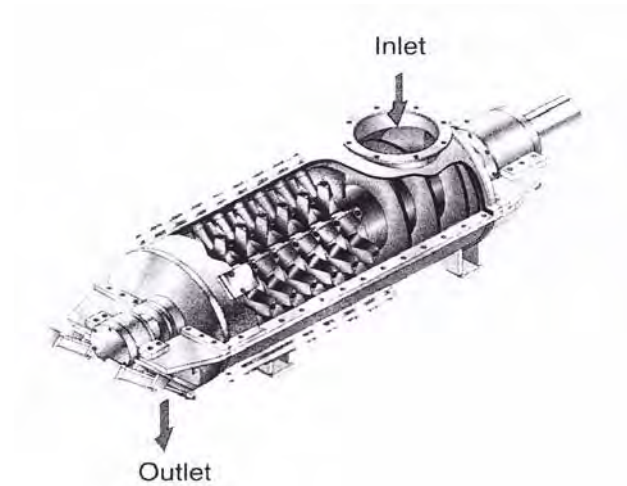
รูปที่ 2-7 เครื่องกำจัดน้ำออกและหลักการการทำงานของเครื่อง [1]

2.1.8 การกระจาย (dispersion)

การกระจายไม่ได้เป็นการกำจัดหมึกออกแต่จะเป็นการตีกระจายเยื่อเพื่อลดขนาดของอนุภาคหมึก กาวเหนียวต่างๆ สารเคลือบ และสารกันซึม ให้มีขนาดเล็กลง โดยในกรณีของหมึกนั้นจะทำการกระจายโดยใช้เครื่องกระจายจนอนุภาคหมึกมีขนาดเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น โดยทั่วไปแล้วเครื่องกระจายมีด้วยกัน 2 แบบคือ เครื่องกระจายแบบ disk disperger ดังแสดงในรูปที่ 2-8 และเครื่องกระจายแบบ kneading disperger ดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-8 เครื่องกระจายแบบ disk disperger [1]



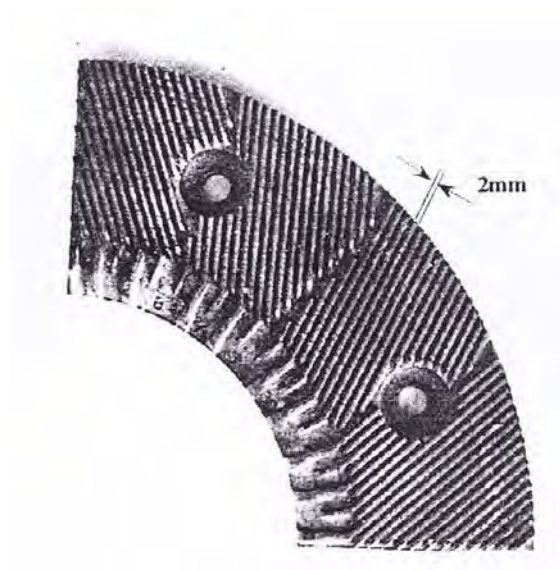
รูปที่ 2-9 เครื่องกระจายแบบ kneading disperger [1]

2.1.9 การฟอกเยื่อ (bleaching)

การฟอกเยื่อเป็นการเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อให้สูงขึ้น ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อและสารเคมีที่นำมาใช้ฟอกเยื่อ

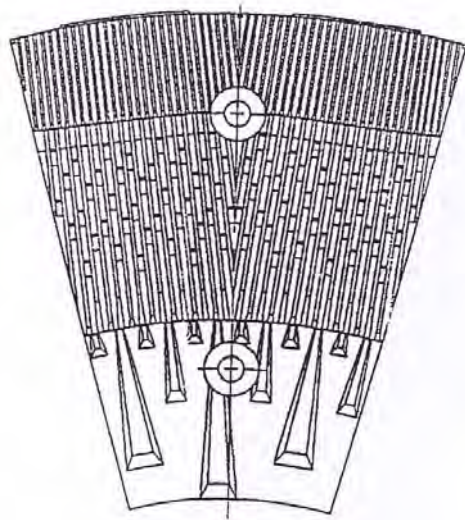
2.1.10 การบดเยื่อ (refining)

การบดเยื่อเป็นการปรับเปลี่ยนผิวหน้าและโครงสร้างของเส้นใย เพื่อให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น การบดเยื่อจะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ และคุณภาพของกระดาษดั้งเดิมที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2-10 ลักษณะพื้นบดของจานบดในเครื่องบดเยื่อแบบความเข้มข้นต่ำ [1]

เครื่องบดเยื่อแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ เครื่องบดเยื่อแบบความเข้มข้นต่ำ (LC refiner) ซึ่งหากพิจารณาตามแนวรัศมีของจานบด (plate) จะพบว่า ลักษณะของฟันบด (fillings) ช่วงที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางของจานบดเป็นช่วงสั้น (รูปที่ 2-10) และเครื่องบดเยื่อแบบความเข้มข้นสูง (HC refiner) ซึ่งพิจารณาตามแนวรัศมีของจานบดแล้วจะพบว่า ลักษณะของฟันบดช่วงที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางของจานบดเป็นช่วงยาวกว่า (รูปที่ 2-11)



รูปที่ 2-11 ลักษณะฟันบดของจานบดในเครื่องบดเยื่อแบบความเข้มข้นสูง [1]

2.2 เคมีของการลอยฟองอากาศ (flotation chemistry)

การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้นประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. การแยกอนุภาคของหมึกออกจากเส้นใย ซึ่งจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ
2. การรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกพิมพ์โดยใช้สารรวบรวม ซึ่งจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ รวมถึงในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ
3. การที่กลุ่มอนุภาคหมึกพิมพ์เกาะติดกับฟองอากาศก่อนที่จะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดต่อไป ซึ่งจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ

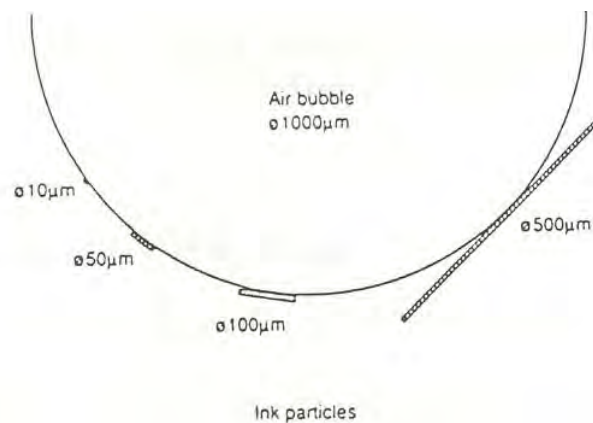
ฉะนั้นการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศจะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้ [3] เกิดขึ้น คือ

1. อนุภาคของหมึกต้องมีการชนกับฟองอากาศ
2. การชนกันจะต้องทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำที่อยู่ระหว่างผิวหน้าอนุภาคของหมึกกับฟองอากาศหายไป

3. ต้องไม่มีการผลักรันระหว่างอนุภาคของหมึกกับฟองอากาศ
4. อนุภาคของหมึกจะต้องมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพื่อที่จะได้ยึดติดกับฟองอากาศได้
5. การที่ฟองอากาศและอนุภาคของหมึกที่เกาะติดอยู่กับฟองอากาศลอยสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ ฟองอากาศต้องมีความแข็งแรงมากพอที่จะเอาชนะแรงที่พยายามแยกอนุภาคของหมึกและฟองอากาศให้ออกจากกัน ซึ่งได้แก่ แรงดึงดูดของโลก (gravity force) และแรงต้านทานเนื่องจากความหนืด (viscous drag) เป็นต้น

2.2.1 ความสำคัญของขนาดอนุภาคหมึก

หากอนุภาคหมึกมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของฟองอากาศจะทำให้อนุภาคของหมึกหลุดออกมาจากฟองอากาศก่อนที่จะลอยขึ้นไปสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ หากอนุภาคหมึกมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของฟองอากาศ โอกาสการชนกันระหว่างอนุภาคหมึกและฟองอากาศจะลดลง เนื่องจากอนุภาคหมึกมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไปตามแนวสตรีมไลน์ (streamline) ที่อยู่รอบฟองอากาศมากกว่าที่จะชนกับฟองอากาศโดยตรง [4-7] ขนาดของอนุภาคหมึกที่เหมาะสมควรอยู่ประมาณ 10-100 ไมโครเมตร เนื่องจากมีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของหมึกและฟองอากาศอย่างเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 รูปแบบการสัมผัสระหว่างอนุภาคของหมึกและฟองอากาศ [4, 5, 7]

2.2.2 ความสำคัญของขนาดฟองอากาศ

ขนาดฟองอากาศในเครื่องลอยฟองอากาศนั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมาก ฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.3 มิลลิเมตร จะมีแรงพยุงตัว (buoyancy) มากพอที่จะดันตัวเองให้ผ่านเครือข่ายของเส้นใย (fiber network) ขึ้นไปสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ [7] ในขณะที่ฟองอากาศที่มี

นอกจากนี้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กเกินไปซึ่งจะมีแรงพยุงตัวน้อย มักจะถูกกักอยู่ในเครือข่ายเส้นใยและมีโอกาสที่จะลอยขึ้นสู่มิวน้ำของเครื่องลอยฟองอากาศได้น้อย อย่างไรก็ตาม หากฟองอากาศเหล่านี้สามารถผ่านเครือข่ายของเส้นใยและลอยขึ้นสู่มิวน้ำของเครื่องลอยฟองอากาศได้ เส้นใยและเส้นใยสั้นๆ (fines) มักจะลอยตามขึ้นมาด้วย ตามทฤษฎีแล้วขนาดของฟองอากาศต่อขนาดของอนุภาคของหมึกที่เหมาะสมคือ 5:1 [4, 5]

2.2.3 ความสำคัญของการผสม

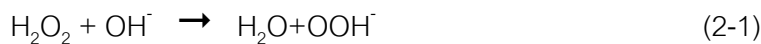
การผสมทำให้อัตราการชนกันระหว่างอนุภาคของหมึกกับฟองอากาศเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความเร็วและความแรงของการผสมต้องเหมาะสม เนื่องจากหากความเร็วหรือความแรงของการผสมมีค่าสูงเกินไปอาจทำให้ฟองอากาศแตก ทำให้ฟองอากาศกับอนุภาคของหมึกแยกออกจากกัน และส่งผลให้อนุภาคของหมึกที่เกาะกันอยู่เกิดการกระจายตัว

2.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึก (deinking chemicals)

การเลือกสารเคมีที่จะนำมาใช้ในการกำจัดหมึกควรคำนึงถึงความเหมาะสมกับกระดาษที่นำกลับมาเวียนใช้ใหม่ ชนิดของหมึกที่ใช้ในการพิมพ์ วิธีการกำจัดหมึก คุณภาพของหมึกที่ใช้ในการพิมพ์ และสิ่งที่สำคัญที่สุดที่ต้องคำนึงถึง สารยึด (binder) ที่ใช้ในหมึก ซึ่งทำหน้าที่ทำให้สารสีหรือสีย้อมในหมึกนั้นยึดติดกับผิวหน้ากระดาษ ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดหมึกออกจากกระดาษนั้น สารเคมีเหล่านี้ต้องเป็นตัวไปทำปฏิกิริยากับสารยึด เพื่อให้อนุภาคของหมึกหลุดออกมาจากผิวหน้าของกระดาษ โดยทั่วไปแล้วสารเคมีที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกได้แก่

2.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide: NaOH)

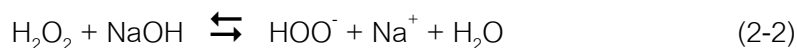
โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยา (Hydrolysis) ส่วนที่เป็นสารยึดหรือเรซินของหมึก โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์มักถูกเติมในขั้นตอนการตีกระดาษเยื่อหรือการฟอกเยื่อ เพื่อปรับสภาพให้ค่าความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในช่วงเบส (pH 9 - 11) ซึ่งถ้าค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วงนี้จะทำให้เส้นใยเกิดการบวมตัว ง่ายต่อการเสียดสีกัน ทำให้อนุภาคหมึกหลุดออกมาจากเส้นใยได้ง่ายขึ้น และยังช่วยป้องกันการรวมตัวของอนุภาคหมึกจากขนาดเล็กจนกลายเป็นขนาดใหญ่ นอกจากนี้โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังช่วยในการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลไอออน (OOH^-) ซึ่งเป็นตัวเคมีของการฟอกเยื่ออย่างแท้จริง ดังแสดงในสมการที่ 2-1



อย่างไรก็ตามหากโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับเยื่อเชิงกลจะทำให้เยื่อเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า alkali darkening ทำให้ความขาวสว่างของเยื่อต่ำลง ดังนั้นปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์กับเยื่อเชิงกลควรอยู่ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์กับเยื่อเคมีควรอยู่ในช่วงร้อยละ 3 ถึง 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2.3.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide: H_2O_2)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มักถูกเติมลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อ โดยที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารฟอกเยื่อเชิงกลที่ทำให้เยื่อมีความขาวสว่างมากขึ้น และช่วยในการทำลายสารยึดพวกอัลคีดเรซิน (alkyd resin binder) ในหมึกออฟเซต นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดเปอร์ไฮดรอกซิลไฮดรอกไซด์ (HOO^-) ดังแสดงในสมการที่ 2-2

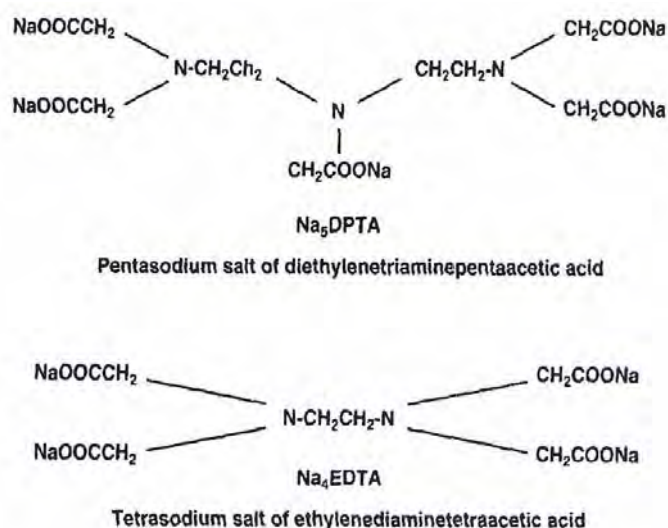


$$\text{pH} = 10-11.5, \text{ T} = 40-80 \text{ }^\circ\text{C}$$

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวได้หากใช้ค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิสูงเกินไป นอกจากนี้ไฮดรอกไซด์ไอออนโลหะหนัก เช่น ไฮดรอกไซด์ไอออนแมงกานีส (Mn^{2+}) ไฮดรอกไซด์ไอออนทองแดง (Cu^{2+}) ไฮดรอกไซด์ไอออนเหล็ก (Fe^{2+}) และเอนไซม์จำพวก catalase สามารถทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการสลายตัวด้วยเช่นกัน วิธีการป้องกันการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำได้โดยการเติมสารที่เรียกว่า สารคงสภาพ (stabilizing agent) ซึ่งได้แก่ สารจับโลหะหนัก (chelants) และ โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) เป็นต้น ปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เนื่องจากถ้าใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่น้อยเกินไปจะทำให้เยื่อเปลี่ยนเป็นสีเหลือง แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งจะกำจัดหมึกออกได้ยากขึ้น

2.3.3 สารจับโลหะหนัก (chelating agents or chelants)

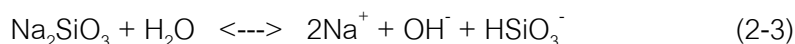
สารจับโลหะหนักมักถูกเติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อเพื่อจับไอออนของโลหะโดยการฟอร์มสารประกอบที่ละลายได้ (soluble complexes) ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้ไอออนโลหะหนักกระตุ้นปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ชนิดของสารจับโลหะหนักที่นำมาใช้ในกระบวนการกำจัดหมึก ได้แก่ DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid) และ EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2-13 โดย DTPA จะไปจับกับโลหะหนักได้ดีกว่า EDTA การจับโลหะหนักโดยใช้ DTPA จะมีการเรียงลำดับจากง่ายไปยากโดยเริ่มจาก $\text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Al}^{3+}$ ปริมาณการใช้สารจับโลหะหนักที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 0.15 ถึง 4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง



รูปที่ 2-13 โครงสร้างของ DTPA และ EDTA [8]

2.3.4 โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate: Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกตมักถูกเติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อ โดยโซเดียมซิลิเกตจะเกิดการแตกตัวดังแสดงในสมการที่ 2-3 ซึ่งไอออนที่ได้จะไปจับกับโลหะหนักแล้วเกิดเป็นคอมเพล็กซ์ไอออน โซเดียมซิลิเกตยังทำให้การกระจายตัวของหมึกดีขึ้น ซึ่งเท่ากับเป็นการช่วยในกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง และยังช่วยป้องกันอนุภาคหมึกไม่ให้กลับมาติดที่ผิวหน้าของเส้นใยอีกครั้ง นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกตยังทำหน้าที่เป็นแหล่งให้ความเป็นเบส และเป็น pH buffer อีกด้วย



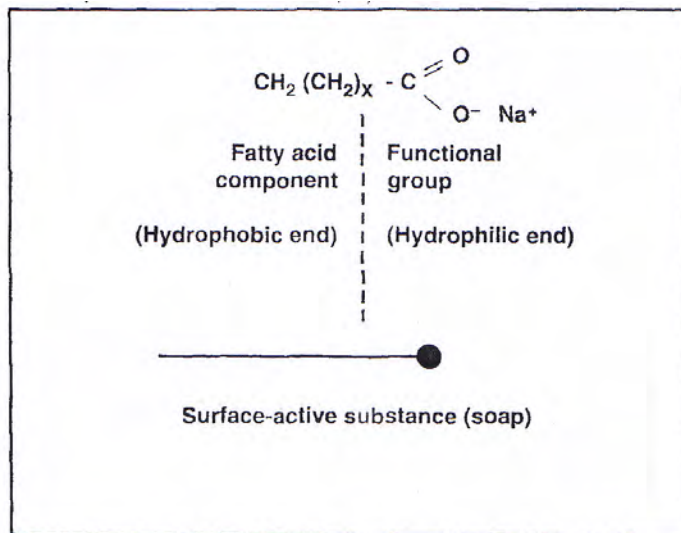
โซเดียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับเยื่อเชิงกลและยังช่วยป้องกันการที่เยื่อเปลี่ยนเป็นสีเหลืองได้ อย่างไรก็ตาม การใส่โซเดียมซิลิเกตในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้การกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศทำได้ยากขึ้น เนื่องจากอนุภาคหมึกมีการกระจายตัวมากเกินไป รวมถึงอาจไปทำลายการทำงานของสารกักเก็บ (retention aid) ได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้น ปริมาณการใช้โซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2.3.5 สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม (agglomerating chemicals)

สารที่ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มมักถูกเติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ การกรองเยื่อ หรือการทำความสะอาดเยื่อ เพื่อช่วยทำให้อนุภาคหมึกโตนเนอร์รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น โดยปกติแล้วอนุภาคหมึกโตนเนอร์มีขนาดใหญ่ และหากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกโตนเนอร์ผ่านการตีกระจายเยื่อไม่เพียงพอ เนื่องจากการใช้เวลาในการตีกระจายเยื่อมากเกินไปอาจส่งผลเสียต่อคุณภาพของเส้นใย อาจส่งผลทำให้อนุภาคหมึกโตนเนอร์มีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศหรือการกำจัดหมึกด้วยวิธีการล้าง แต่จะมีขนาดเล็กเกินไปสำหรับการทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือการกรองเยื่อ ฉะนั้นการใช้สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่มอาจเป็นอีกหนึ่งทางเลือก เนื่องจากการใส่สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่มลงไปทำให้อนุภาคหมึกรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น เพื่อจะได้ถูกกำจัดด้วยการทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือการกรองเยื่อได้

2.3.6 สารลดแรงตึงผิว (surfactants)

สารลดแรงตึงผิวมักถูกเติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ หรือการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้าง โดยทั่วไปสารลดแรงตึงผิวสามารถถูกใช้งานได้หลายบทบาทหน้าที่ โดยสามารถทำตัวเป็นสารกระจาย (dispersants) สารรวบรวม (collectors) สารเปียกผิว (wetting agents) และสารกึ่งกระจายกึ่งรวบรวม (displectors) สารลดแรงตึงผิวประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ดังแสดงในรูปที่ 2-14 ซึ่งส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) อาจเป็นได้ทั้งเส้นตรง (linear) และกิ่งก้านสาขา (branch) แบบอิ่มตัว (saturated) และไม่อิ่มตัว (unsaturated) ส่วนที่ชอบน้ำประกอบไปด้วยสารลดแรงตึงผิวแบบมีขั้ว (ionic surfactants) และ แบบไม่มีขั้ว (non-ionic surfactants) ซึ่งสารลดแรงตึงผิวแบบมีขั้วสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แบบประจุบวก (cationic) แบบประจุลบ (anionic) และแบบที่มีทั้งประจุบวก

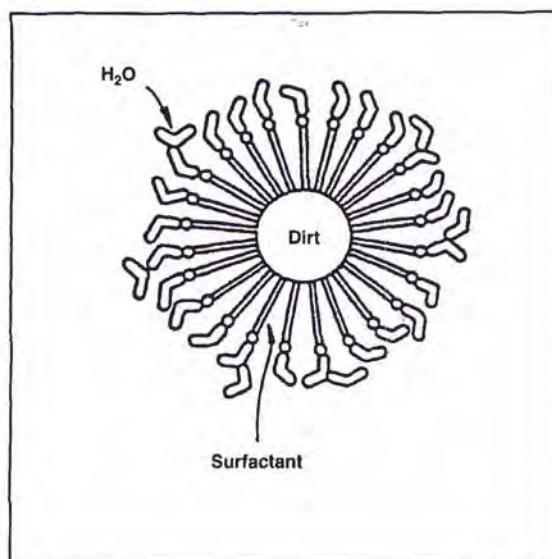


รูปที่ 2-14 ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว [2]

สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้มีการเปียกผิวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยทำให้การกำจัดหมึกออกและการกระจายตัวของอนุภาคหมึกดีขึ้นเมื่อมีการดูดซับสารลดแรงตึงผิวที่ผิวหน้า อย่างไรก็ตามการใส่สารลดแรงตึงผิวมากเกินไป ทำให้เกิดฟองอากาศมาก ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตที่ได้ (yield) น้อยลง โดยหากอัตราส่วนระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคหมึกมีค่ามากขึ้น ย่อมส่งผลทำให้การกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2 ถึง 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิวและวิธีการกำจัดหมึกออกเป็นสำคัญ

2.3.7 สารกระจาย (dispersants)

สารกระจายมักถูกเติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้าง โดยใส่เพื่อช่วยทำให้หมึกกระจายตัวออกเป็นอนุภาคเล็กๆ และมีสมบัติที่ชอบน้ำโดยการฟอร์มตัวเป็น micelle ดังแสดงในรูปที่ 2-15 เพื่อสะดวกต่อการกำจัดหมึกด้วยวิธีการล้าง โดยปกติสารกระจายที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ nonylphenol ethoxylate, alkylphenol ethoxylate และ linear alcohol เป็นต้น โดยปริมาณการใช้สารกระจายที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2 ถึง 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง



รูปที่ 2-15 Micelle [8]

2.3.8 สารรวบรวม (collectors)

สารรวบรวมมักถูกเติมในขั้นตอนการกระจายเชื้อหรือการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เพื่อให้อนุภาคหมึกไปสัมผัสกับสารรวบรวมจนมีการเกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นกลุ่มก้อนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะไปสัมผัสกับฟองอากาศและถูกกำจัดออกไปจากเครื่องลอยฟองอากาศในที่สุด นอกจากนี้แล้วสารรวบรวมยังช่วยปรับปรุงแรงตึงผิวของฟองอากาศเพื่อให้มีความแข็งแรงมากพอที่จะสามารถนำอนุภาคหมึกให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำของเครื่องลอยฟองอากาศได้เพื่อถูกกำจัดต่อไป โดยปกติสารรวบรวมที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ fatty acid soap และ synthetic collectors เป็นต้น

2.3.9 สารกึ่งกระจายกึ่งรวบรวม (displectors)

สารกึ่งกระจายกึ่งรวบรวมนิยมใช้กันมากในทวีปอเมริกาเหนือ โดยคำว่า displectors นี้เป็นคำที่เกิดจากการรวมคำว่า dispersants กับ collectors เข้าด้วยกัน สารนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกแบบผสม กล่าวคือ มีการใช้ทั้งการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและการกำจัดหมึกด้วยวิธีการล้าง โดยสารนี้จะไปทำให้อนุภาคหมึกมีแรงยึดเกาะกับฟองอากาศได้ดีในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ในขณะเดียวกันก็ทำให้อนุภาคหมึกมีสมบัติเป็นส่วนของที่ชอบน้ำมากพอที่จะป้องกันไม่ให้อนุภาคหมึกกลับมาเกาะติดที่เส้นใยได้อีกครั้ง ทำให้ทนต่อความกระด้างของน้ำและไม่ทำให้เกิดตะกรัน (scaling) บนเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รวมไปถึงทำให้ปริมาณผลผลิตที่สูงสูญเสียไปลดลงและมีสารเคมีตกค้างน้อยลง

2.4 หมึกพิมพ์โทนเนอร์ (toner)

โดยทั่วไปแล้ว หมึกพิมพ์โทนเนอร์ประกอบด้วย สารสี (pigment) และเรซิน (resin) ที่ทำหน้าที่เป็นสารยึด รวมถึงสารอื่นๆ เช่น สารเติมแต่งควบคุมประจุ (charge control additive) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมระดับของประจุที่ก่อให้เกิดภาพ สารเติมแต่งเพื่อให้โทนเนอร์ไหลได้ดีขึ้น สารเติมแต่งสมบัติแม่เหล็ก เป็นต้น เรซินที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดนั้นมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์ (thermoplastic) โดยมีขนาดของเรซินตั้งแต่ 8-20 ไมโครเมตร มีอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ 55-70 องศาเซลเซียส เรซินจะทำหน้าที่ยึดเกาะผงหมึกโทนเนอร์ให้ติดกับแผ่นกระดาษหลังจากที่กระดาษผ่านความร้อน ตัวอย่างของเรซินที่ใช้ในระบบหมึกพิมพ์โทนเนอร์ ได้แก่ สไตรีนอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (styrene-acrylate copolymer) และสไตรีนบิวทาไดอีนโคพอลิเมอร์ (styrene butadiene copolymer) และ พอลิเอสเตอร์ (polyester) เป็นต้น [9] โดยทั่วไปแล้วโทนเนอร์มีประจุเป็นลบ

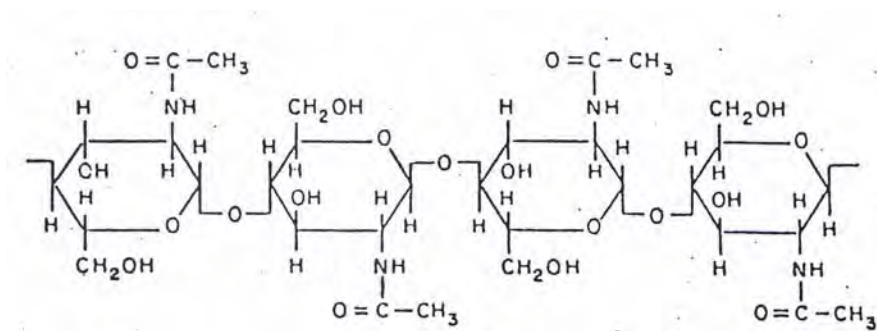
2.5 ไคตินและไคโทซาน (chitin and chitosan)

ไคตินและไคโทซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่พบมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากเซลลูโลส (cellulose) พอลิเมอร์ทั้งสองทำหน้าที่เป็นโครงสร้างเพื่อป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยไคตินและไคโทซานจะพบมากในโครงสร้างเปลือกภายนอกของสัตว์ทะเล เช่น กุ้ง ปู ปลาหมึก เป็นต้น รวมทั้งยังพบในผนังเซลล์ของเชื้อรา และแมลงปีกแข็ง เป็นต้น โดยแต่ละแหล่งจะมีปริมาณไคตินต่างๆ กัน [10] ดังแสดงในตารางที่ 2-1

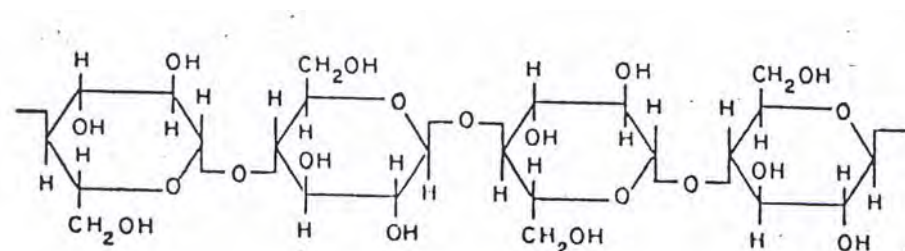
ไคตินเป็นพอลิเมอร์แบบเส้นตรงที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับเซลลูโลส ดังแสดงในรูปที่ 2-16 และ รูปที่ 2-17 ตามลำดับ แต่จะแตกต่างกันตรงที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งไคตินเป็นหมู่ Acetylated amino ($-NH-CO-CH_3$) แต่เซลลูโลสเป็นหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) โดยไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly-N-acetyl-D-glucosamine มีสูตรทั่วไปดังนี้ $(C_8H_{13}NO_5)_n$ ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากไคตินนั้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากไคตินไม่สามารถละลายในสารละลายทั่วไป แต่ไคตินสามารถเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานได้ด้วยวิธีการทางเคมีคือ การเปลี่ยนไคตินให้เป็นไคโทซาน

ตารางที่ 2-1 ปริมาณไคทินที่พบในสิ่งมีชีวิตต่างๆ [11]

แหล่งวัตถุดิบ	ปริมาณไคทินที่พบ (%)
ปลาหมึก	3-20
เข็วรา	5-20
หนอน	20-38
แมงป่อง	30
แมลงสาบ	35
แมลงปีกแข็ง	37
แมงมุม	38
กิ้ง	40
หนอนไหม	44
ปูเสฉวน	69
ปูหิน	70

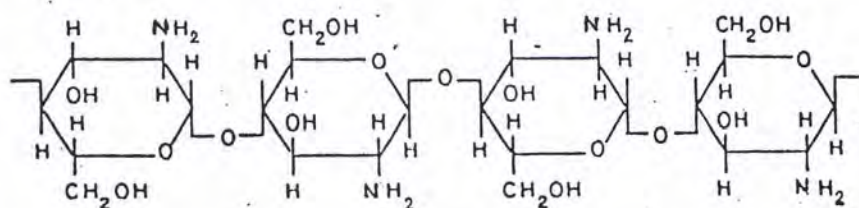


รูปที่ 2-16 สูตรโครงสร้างของไคทิน [12]



รูปที่ 2-17 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส [12]

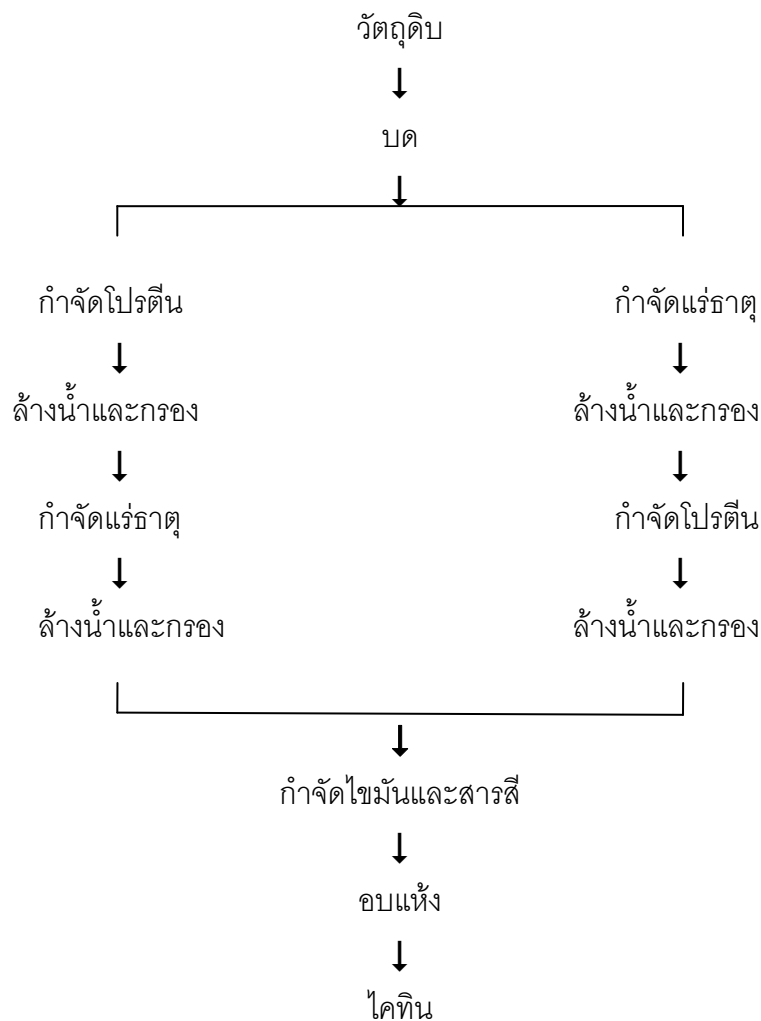
โคโทซานเป็นโคทินในรูปที่มีปริมาณหมู่แอสีทิล (acetyl-COCH₃) ต่ำ โดยเกิดจากปฏิกิริยากำจัดหมู่แอสีทิล (deacetylation) ของโคทินด้วยด่างเข้มข้นทำให้โครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนไป โดยหมู่อะซิตามิโด (acetamido-NHCOCH₃) เปลี่ยนไปเป็นหมู่อะมิโน (amino-NH₂) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สอง โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2-18 ดังนั้นโคโทซานมีชื่อทางเคมีว่า Poly-β-(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose โคโทซานมีสมบัติในการละลายในตัวทำละลายกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก สารละลายกรดอะซิติก และละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ จึงทำให้มีการใช้ประโยชน์จากโคโทซานมากกว่าโคทิน โดยที่หลักการทำงานของโคโทซานจะทำงานเป็นทั้งตัวตกตะกอนและตัวสร้างตะกอน หากโคโทซานทำหน้าที่เป็นตัวตกตะกอนจะพบว่าโคโทซานจะจับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา หากทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอนพบว่าโคโทซานจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอยในน้ำนั้นเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น จนมีขนาดใหญ่พอที่จะตกลงมาเป็นตะกอน



รูปที่ 2-18 สูตรโครงสร้างของโคโทซาน [12]

2.5.1 กระบวนการเตรียมโคทิน

กระบวนการเตรียมโคทินประกอบไปด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ การกำจัดโปรตีน (deproteinization) การกำจัดแร่ธาตุ (deminalization) และ การกำจัดไขมันและเม็ดสี (elimination of lipids and pigments) ซึ่งขั้นตอนการกำจัดโปรตีนและการกำจัดแร่ธาตุสามารถทำสลับก่อนหลังกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-19



รูปที่ 2-19 ขั้นตอนการเตรียมไคติน [12]

2.5.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

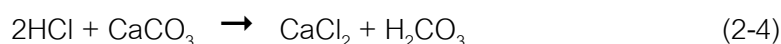
นำวัตถุดิบ เช่น เปลือกกุ้ง มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง หากต้องการเก็บวัตถุดิบไว้ใช้ระยะหนึ่งจะต้องนำวัตถุดิบที่ล้างทำความสะอาดแล้วไปต้มและล้างด้วยสารละลายต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant solution) จากนั้นนำไปอบแห้งหรือตากแห้งเพื่อทำให้สามารถนำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องได้ รวมถึงเพื่อความสะอาดต่อการขนส่ง โดยอาจมีการบดละเอียดเพื่อลดขนาดวัตถุดิบ

2.5.1.2 การกำจัดโปรตีน (deproteinization)

สารละลายต่างที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดโปรตีนคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังมีการใช้สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลาย

2.5.1.3 การกำจัดแร่ธาตุ (demineralization)

สารละลายที่นำมาใช้ในการกำจัดแร่ธาตุ คือ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง โดยส่วนใหญ่เป็นเกลือแคลเซียมคาร์บอเนต มีการทำปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2-4



นอกจากนี้ยังมีการนำกรดซัลฟิวรัส (H_2SO_4) มาใช้กำจัดแร่ธาตุในการเตรียมโคทินระดับอุตสาหกรรม ซึ่งมีข้อดีคือ กรดซัลฟิวรัสเป็นกรดแก่ทำให้สามารถลดปฏิกิริยาการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโคทิน และยังสามารถเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ รวมถึงผลพลอยได้ เช่น แคลเซียมซัลไฟต์ (CaSO_3) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งทั้งหมดสามารถนำไปขายต่อได้

2.5.1.4 การกำจัดไขมันและสารสี (elimination of lipids and pigments)

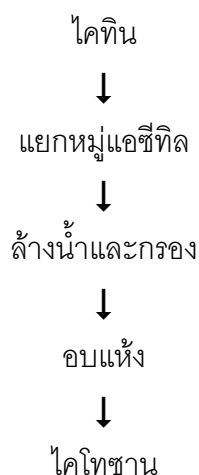
ตัวทำละลายที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดไขมันและสารสี ได้แก่ แอลกอฮอล์ อะซีโตน และอีเทอร์ หรือสารละลายเปอร์แมงกานेट โดยอาจทำในระหว่างขั้นตอนการกำจัดโปรตีนและการกำจัดแร่ธาตุ หรือหลังจากการกำจัดโปรตีนและแร่ธาตุไปแล้ว อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้อาจไม่จำเป็นต้องทำได้

2.5.1.5 การกำจัดน้ำและการอบแห้ง

ตัวทำละลายที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดน้ำ ได้แก่ แอลกอฮอล์ อะซีโตน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากขั้นตอนการกำจัดไขมันและสารสี โดยทั่วไปแล้วการอบแห้งจะกระทำภายใต้สภาวะบรรยากาศหรือภายใต้สภาวะความดันต่ำ

2.5.2 กระบวนการเตรียมโคโทซาน

กระบวนการเตรียมโคโทซานประกอบด้วยขั้นตอนเพียงขั้นตอนเดียวคือ การกำจัดหมู่แอซิติล (deacetylation) ในโคทิน ด้วยสารละลายที่เป็นด่างร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2-20



รูปที่ 2-20 ขั้นตอนการเตรียมไคโทซาน [12]

2.5.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคตินและไคโทซาน

2.5.3.1 การละลาย

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุจึงทำให้ไม่สามารถละลายในน้ำ สารละลายต่างเจือจาง สารละลายต่างเข้มข้น กรดเจือจาง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ แต่สามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น กรดซัลฟิวริกเข้มข้น กรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิก ความยากในการละลายไคตินในตัวทำละลายต่างๆ เป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลที่อยู่กันอย่างหนาแน่น มีพันธะเกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน

ไคโทซานไม่สามารถละลายได้ในน้ำ ค้าง และ ตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ละลายในสารละลายกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2-2 โดยที่สารละลายกรดอินทรีย์ต้องมีค่าความเป็นกรด-เบส น้อยกว่า 6 กรดที่นิยมนำมาใช้ในการละลายไคโทซานคือกรดอะซีติก และกรดฟอร์มิก นอกจากนี้ยังมีกรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก ที่สามารถละลายไคโทซานได้ด้วยเช่นกัน แต่ต้องอยู่ภายใต้การกวนที่อุณหภูมิปานกลาง อย่างไรก็ตามอาจจะมีตะกอนสีขาวคล้ายเจลเกิดขึ้น [10]

ตารางที่ 2-2 ความสามารถในการละลายโคโธซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่มีความเข้มข้นของกรดแตกต่างกัน [13]

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (% โดยน้ำหนัก)				
	1	5	10	50	>50
Formic	✓	✓	✓	✓	✓
Acetic	✓	✓	✓	✓	
Lactic	✓	✓	✓		
Malic	✓	✓	✓		
Hydrochloric	✓	x	x		
Nitric	✓	x	x		
Tartalic	x		✓		
Adipic	✓				
H ₃ PO ₄ *	x	x	x		
Sulfuric	x	x	x		
Citric	x				

✓ สามารถละลายได้ x ไม่สามารถละลายได้

* โคโธซานไม่ละลายในกรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก แต่ละลายในกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นของกรดน้อยกว่า 0.5%

2.5.3.2 ความหนืด (viscosity)

ความหนืดของโคโธซานจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล ระดับการกำจัดหมู่แอซีทิล ความแข็งแรงแบบมีขั้ว (ionic strength) ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิ โดยปกติเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามชนิดของกรดที่นำมาใช้และการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลของความหนืดที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของโคโธซานในกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนืดของโคโธซานในกรดแอซิทิกเพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรด-เบสลดลง [10]

2.5.3.3 ระดับการกำจัดหมู่แอสีทิล (degree of Deacetylation)

ระดับการกำจัดหมู่แอสีทิลเป็นตัวบ่งบอกถึงความเป็นไคตินหรือไคโทซาน เนื่องจากไคตินและไคโทซานเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง 2 หน่วยย่อยของ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนที่อยู่ร่วมกันของหน่วยย่อยแรกมีมากกว่า คือ ระดับการกำจัดหมู่แอสีทิลต่ำจะแสดงสมบัติของไคติน แต่ถ้าสัดส่วนที่อยู่ร่วมกันของหน่วยย่อยที่สองมีมากกว่า คือ ระดับการกำจัดหมู่แอสีทิลมีค่าสูงจะแสดงสมบัติของไคโทซาน การที่จะนำไคโทซานไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ต้องคำนึงถึงระดับการกำจัดหมู่แอสีทิลซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของไคโทซาน โดยที่จะมีการวิเคราะห์ค่าระดับการกำจัดหมู่แอสีทิลด้วย Infrared spectroscopy (IR) และ elemental analysis (EA) เป็นต้น [10, 14]

2.5.3.4 น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)

โดยทั่วไปแล้วน้ำหนักโมเลกุลของไคตินในธรรมชาติจะมีค่ามากกว่า 1×10^6 ดอลตัน ในส่วนของไคโทซานมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1×10^5 ถึง 1.2×10^6 ดอลตัน [10]

2.5.4 ประโยชน์ของไคตินและไคโทซาน

โดยปกติไคตินและไคโทซานมีสมบัติที่คล้ายคลึงกัน แต่มีการนำไคตินไปใช้ประโยชน์น้อยมาก เนื่องจากไคตินไม่สามารถละลายในตัวทำละลาย แต่ไคโทซานสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่เป็นกรดเจือจาง ดังนั้นไคโทซานจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก ไคตินและไคโทซานเป็นสารธรรมชาติ เป็นวัสดุทางชีวภาพ และย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ ซึ่งจะปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในหลายๆ ด้าน ซึ่งจะจำแนกออกเป็นด้านต่างๆ ดังนี้

2.5.4.1 ด้านสิ่งทอและกระดาษ

สำหรับในอุตสาหกรรมกระดาษไคโทซานช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ ใช้ร่วมกับหมึกที่มีประจุลบส่งผลให้งานพิมพ์คมชัดสวยงาม และยังเป็นสารเติมแต่งที่ดี นอกจากนี้ไคโทซานยังถูกใช้เป็นสารช่วยการยัดติดโดยใช้เพียง 1% โดยน้ำหนัก กระดาษที่ได้จะมีความทนทานเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะขณะเปียก ซึ่งเหมาะสำหรับทำผ้าอ้อมแบบใช้แล้วทิ้ง หรือทำกระดาษเช็ดมือ สำหรับด้านสิ่งทอ เส้นใยสังเคราะห์ที่เคลือบด้วยไคตินและไคโทซาน และผ้าทอใย

2.5.4.2 ด้านการบำบัดน้ำเสีย

โคโทซานถูกนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อแยกโลหะหนัก และโลหะมีพิษออก เนื่องจากโคโทซานสามารถจับกับไอออนโลหะหนักหลายชนิดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เช่น พรอท ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม และแมกนีเซียม เป็นต้น ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะของโคโทซานขึ้นอยู่กับเวลาในการดูดซับ ขนาดหรือพื้นที่ผิวของโคโทซาน ความเข้มข้นของไอออนเริ่มต้น และคุณภาพของโคโทซาน เป็นต้น นอกจากนี้โคโทซานเป็นตัวตกตะกอนและตัวสร้างตะกอนที่ดี เนื่องจากประกอบไปด้วยหมู่อะมิโนจำนวนมากบนสายพอลิเมอร์ที่สามารถไปจับกับสารที่มีประจุลบ เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก และสีย้อม ทำให้เกิดการตกตะกอนซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำให้ใสขึ้น [15]

2.5.4.3 ด้านการเกษตร

โคโทซานใช้เป็นตัวเชื่อมในสารเคลือบเมล็ดพันธุ์เพื่อช่วยในการยับยั้งเชื้อรา ปกป้องพืช ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น รวมถึงใช้เป็นสารเคลือบเมล็ดพันธุ์ป้องกันการชุกชืด เพื่อกำจัดปัญหาการสูญเสียสารเคมีเคลือบเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ในการป้องกันโรคและแมลงทำให้อัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์สูงขึ้น แผ่นฟิล์มที่เคลือบบนเมล็ดพันธุ์จะช่วยป้องกันความเสียหายของเมล็ดจากสารเคมีภายนอก ลดการเกิดฝุ่นในเวลากการเก็บเกี่ยวและการหว่าน ใช้เป็นตัวเชื่อมในอาหารสัตว์ อาหารที่ได้จึงมีความปลอดภัย ประหยัด ถูกย่อยและดูดซึมได้ โคโทซานยังถูกใช้ผสมลงในปุ๋ยน้ำสำหรับพืชไม้ดอกเพื่อสามารถยึดติดกับผิวของพืช ผิวดินได้ดี ทนต่อการชะล้าง ลดการระเหยของน้ำ เป็นตัวควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารและยาให้กับพืช และทำให้การกระจายตัวของปุ๋ยน้ำดีขึ้น มีความคงตัวสูง [15]

2.5.4.4 ด้านการแพทย์และเภสัช

โคทินและโคโทซานนำไปใช้เพื่อรักษาบาดแผล ทั้งแผลผ่าตัดหรือแผลไฟไหม้ ทำให้แผลหายเร็วขึ้น หรือทำเป็นไหมเย็บแผลซึ่งจะใช้เย็บแผลได้ดีกว่าไหมสังเคราะห์ เนื่องจากสามารถสลายตัวได้เองเมื่อแผลติดกันแล้วโดยที่คนไข้ไม่เกิดอาการแพ้ ใช้เป็นคอนแทกเลนส์เนื่องจากยอมให้ออกซิเจนผ่านเข้าออกได้โดยไม่เกิดอาการแพ้ ใช้ทำเป็นแคปซูลบรรจุยา ใช้

2.5.4.5 ด้านเครื่องสำอาง

โคทินและโคโทซานถูกประยุกต์ใช้ในเครื่องสำอางเพื่อเพิ่มความชื้นเหนียวให้กับครีม ใช้เป็นส่วนประกอบของโลชั่นเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นและเนียนนุ่ม ใช้เป็นส่วนประกอบในยาสระผมและครีมนวดผมเพื่อช่วยเก็บความชุ่มชื้นและทำให้เส้นผมนุ่มขึ้น ใช้เป็นส่วนประกอบในแป้งแต่งหน้าเพื่อเพิ่มความเรียบและชุ่มชื้นให้กับผิวหน้า ใช้เป็นส่วนประกอบในสบู่อ่างหน้าเพื่อทำความสะอาดและลดความมันบนใบหน้า

2.5.4.6 ด้านอาหาร

แผ่นฟิล์มโคโทซานสามารถยืดอายุอาหารได้ดี เนื่องจากสามารถควบคุมการถ่ายเทความชื้นระหว่างอาหารและสภาวะแวดล้อมภายนอก และควบคุมอุณหภูมิได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำโคโทซานมาเคลือบผัก ผลไม้ เช่น ส้ม สตรอเบอร์รี่ มะเขือเทศ แตงกวา และมะนาว เป็นต้น โคทินและโคโทซานใช้เป็นสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร เช่น เชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา โคโทซานสามารถละลายและมีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ดีกว่าโคทิน เนื่องจากการที่โคโทซานเป็นโมเลกุลที่มีประจุบวกสามารถเกิดปฏิกิริยากับเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบ ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารอื่นๆ ของเซลล์ หรือการที่โคโทซานเป็นสารจับโลหะหนัก ซึ่งสามารถเลือกจับโลหะแม้ในปริมาณน้อยๆ ได้ ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตสารพิษและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ [15]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen และ คณะ [17] ทำการทดลองโดยใช้โคโทซานช่วยในการกำจัดสาหร่ายทะเล (algae) ออกจากน้ำโดยวิธีการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่า การใส่โคโทซานทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากโคโทซานทำหน้าที่เหมือนสารรวบรวม (collector) ทำให้สาหร่ายเกิดการรวมกลุ่มกันมากขึ้นจนสามารถถูกกำจัดออกไปด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมากขึ้น

Lertsutthiwong และคณะ [18] ได้ศึกษาถึงการใส่ไคโทซานเป็นสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ จากการศึกษพบว่า การใส่ไคโทซานในปริมาณร้อยละ 0.25 ถึง 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง สามารถเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษได้ดี โดยเฉพาะสภาวะการผลิตที่เป็นกรดและกลาง ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการใส่ไคโทซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษนั้น ได้แก่ ปริมาณไคโทซานที่ใช้และสภาวะความเป็นกรด-เบสในการผลิตกระดาษ

Laleg และ Pikulik [19] ได้ศึกษาถึงการเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษขณะเปียกโดยใช้ไคโทซาน จากการทดลองพบว่า ไคโทซานสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษขณะเปียกให้กับแผ่นกระดาษและกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่ ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมไคโทซานขึ้นอยู่กับความเป็นกรดของน้ำเยื่อ เยื่อที่ใส่ไคโทซานที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7.5 ให้ค่าสภาพระบายน้ำสูงที่สุด ขณะที่แผ่นทดสอบที่ทำมาจากเยื่อที่ใส่ไคโทซานที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 10 จะให้ความแข็งแรงของกระดาษขณะเปียกและแผ่นกระดาษสูงที่สุด

Sheridan และคณะ [20] ได้ศึกษาถึงการป้องกันหมึกย้อนกลับไปที่เส้นใยในกระบวนการกำจัดหมึกซึ่งช่วยปรับปรุงเส้นใยรีไซเคิล จากการทดลองพบว่า วิธี encapsulated hydrophobic particles (EPD) ซึ่งถูกนำไปเปรียบเทียบกับระบบรวบรวมหมึกแบบทั่วไปในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเพื่อเพิ่มความขาวสว่าง อิทธิพลของขนาดอนุภาคและความไม่ชอบน้ำของอนุภาคพร้อมด้วยกลไกโดยการทำงานของสารประกอบได้ถูกนำมาอภิปราย ข้อดีของระบบ EPD มีมากกว่าการรวบรวมสารเคมีแบบทั่วไป คือ สามารถที่จะควบคุมขนาดอนุภาคหมึกหรือตัวรวบรวมเพื่อวิธีการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดโดยไม่คำนึงถึงสภาพน้ำที่มีอยู่

ปนัดดา กลิ่นบัว [21] ได้ศึกษาถึงผลของการใส่ไคโทซานร่วมกับเซลลูโลสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่พิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่า เมื่อใส่ไคโทซานเพียงอย่างเดียวในการกำจัดหมึกออกนั้น ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและค่าความเข้มข้นของหมึกที่เหลืออยู่มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามการใส่ปริมาณไคโทซานที่มากเกินไปกลับส่งผลให้ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มลดลงและค่าความเข้มข้นของหมึกที่เหลืออยู่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการใส่ไคโทซานมากขึ้น ไคโทซานซึ่งมีประจุเป็นบวกอาจจะไปจับตัวกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบได้ดีกว่า จนกระทั่งเหลือพื้นที่ผิวของไคโทซานในการทำหน้าที่เป็นสารรวบรวมจับอนุภาคหมึกได้น้อยลง ส่วนการใส่ไคโทซานร่วมกับเซลลูโลสนั้นกลับพบว่า การใส่ไคโทซานร่วมกับเอนไซม์ส่งผลให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองที่มีการใส่ไคโทซานเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากค่า

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของไคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมักโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 สภาวะ โดยสภาวะที่ 1 เป็นการทดลองควบคุม ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทดลองที่ไม่มีการใส่ไคโทซาน โดยมีการใช้ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ คือ ช่วงกรด (pH 5 ± 0.2) ส่วนสภาวะที่ 2 เกี่ยวข้องกับการทดลองที่มีการใส่ไคโทซานลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ โดยใช้ค่าความเป็นกรด-เบสในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อในช่วงกรด คือ pH 5 ± 0.2 เนื่องจากไคโทซานละลายในสภาวะกรดเท่านั้น ส่วนอุณหภูมิและเวลาในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อเหมือนกับการทดลองในสภาวะที่ 1 ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปริมาณของไคโทซาน น้ำหนักโมเลกุลของไคโทซาน เพื่อทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมักโทนเนอร์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ในแต่ละสภาวะจะทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลความมีนัยสำคัญของตัวแปรเหล่านี้โดยใช้การออกแบบทางแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การทดลองจะเริ่มจากนำกระดาษขนาด A-4 มาทำการพิมพ์ด้วยหมักโทนเนอร์โดยมีการควบคุมปริมาณหมักให้เท่ากันทุกแผ่น โดยพิมพ์ในรูปแบบตามที่แสดงในรูปที่ 3-1 จากนั้นนำกระดาษที่ผ่านการพิมพ์แล้วมาเก็บไว้ในที่ที่ไม่ถูกแสงและความชื้น เพื่อควบคุมสภาวะเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำกระดาษมาตัดโดยใช้เครื่องย่อยเอกสาร หลังจากนั้นแช่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน เพื่อให้กระดาษอ่อนตัวและง่ายต่อการตีกระจายเยื่อ เมื่อแช่น้ำจนครบเวลาที่กำหนดแล้ว นำกระดาษมาตีกระจายเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อเพื่อแยกอนุภาคหมักให้ออกจากเส้นใย เมื่อตีกระจายเยื่อเสร็จจะนำเยื่อที่ได้เข้าสู่กระบวนการลอยฟองอากาศ จากนั้นหาค่าผลผลิตที่ได้และนำเยื่อที่ได้จากทั้งก่อนและหลังการลอยฟองอากาศมาหาค่าสภาพระบายน้ำ ก่อนที่จะนำเยื่อทั้งก่อนและหลังการลอยฟองอากาศมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบ จากนั้นนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดหาค่าสมบัติเชิงแสง เช่น ความขาวสว่าง ความทึบแสง ปริมาณหมักที่เหลืออยู่ เป็นต้น และนำไปวัดหาค่าสมบัติทางกายภาพ เช่น ดัชนีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก เป็นต้น เมื่อทำการทดสอบสมบัติต่างๆ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาผลของไคโทซาน อันได้แก่ ปริมาณที่ใช้และน้ำหนักโมเลกุล ต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมักโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้การออกแบบทางแฟกทอเรียลสองระดับ สองตัวแปร



เครื่องบิน แอร์บัส A 380 เป็นเครื่องบินห้องโดยสารสองชั้นขนาดใหญ่ ผลิตโดยแอร์บัสแอสอาเอส เครื่องบินสี่เครื่องยนต์ลำนี้

การบินไทยสั่งซื้อเครื่องบิน [แอร์บัส เอ 380](#) ซึ่งจะส่งมอบตั้งแต่ พ.ศ. 2555 เพื่อใช้ในเที่ยวบินไปแฟรงค์เฟิร์ต, ปารีส และ

รูปที่ 3-1 ตัวอย่างภาพพิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์บนกระดาษขนาด A-4 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 กระดาษขนาด A-4 ยี่ห้อ IDEA WORK บริษัท SCG PAPER จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย

3.1.2 หมึกโทนเนอร์ยี่ห้อ HP รุ่น 35A สำหรับเครื่องพิมพ์ HP Laser Jet P1006 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.3 ไคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลระดับต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลของไคโทซาน 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของ ไคโทซาน (type)	น้ำหนักโมเลกุล โดยประมาณ (approximate molecular weight)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ กำจัดหมู่แอสีทิล (% deacetylation)	ที่มา	ประเทศ
1	32,000	82.20±0.45	บริษัท Seafresh Chitosan (Lab) จำกัด	ไทย
2	21000	86.80±0.43	บริษัท Aquatic Nutrition Lab จำกัด	ไทย
3	6500	88.33±0.69	บริษัท Seafresh Chitosan (Lab) จำกัด	ไทย

3.1.4 สารลดแรงตึงผิว (non-ionic surfactant) บริษัท Eka Chemicals จำกัด ประเทศไทย

3.1.5 กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) บริษัท Merck KGaA จำกัด ประเทศเยอรมนี

3.1.6 กรดอะซีติก ประเทศไทย

3.1.7 เครื่องย่อยกระดาษ ยี่ห้อ Freline ประเทศจีน

3.1.8 เครื่องพิมพ์ HP Laser Jet P1006 บริษัท Hewlett-Packard Development Company ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.9 เครื่องตีกระจายเยื่อ (pulper) ยี่ห้อ Formax รุ่น 450H บริษัท Adirondack Machine Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.10 เครื่องลอยฟองอากาศ (flotation Cell) ยี่ห้อ Voith รุ่น Delta 25 บริษัท Voith ประเทศเยอรมนี

3.1.11 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet former) ยี่ห้อ PTI รุ่น RK-2A KWT บริษัท Paper Testing Association ประเทศออสเตรเลีย

3.1.12 เครื่องวัดค่าสภาพกระดาษ (freeness tester) ยี่ห้อ Regmed รุ่น CF/A บริษัท Regmed ประเทศบราซิล

3.1.13 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (optical tester) ยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color-Touch PC บริษัท Technidyne Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.14 เครื่องวัดค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile tester) ยี่ห้อ Stograph รุ่น E-S บริษัท Toyo Seiki Seisaku-Sho จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.1.15 เครื่องวัดความต้านทานต่อแรงฉีก (tear tester) ยี่ห้อ Pro Tear Electronic Elmendorf Tear Tester บริษัท Thwing-Albert instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.16 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst tester) ยี่ห้อ Lorentzen & Wettre ประเทศสวีเดน

3.1.17 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (thickness tester); Frank, Germany

3.1.18 เครื่องชั่ง (balance) ยี่ห้อ GX-30K บริษัท A&D Co.Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

3.1.19 เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง (balance) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PM 2500 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.1.20 ตู้อบ (oven) ยี่ห้อ MMM รุ่น Venticell บริษัท MMM Medcenter Einrichtungen GmbH ประเทศเยอรมัน

3.1.21 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH meter) ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI 98128 บริษัท Hanna Instrument ประเทศไทย

3.2 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองจะถูกอธิบายเป็น 2 สภาวะ คือ การทดลองควบคุมและการทดลองที่ใช้โคโทซาน ดังนี้

3.2.1 สภาวะที่ 1: การทดลองควบคุม

3.2.1.1 นำกระดาษขนาด A-4 มาทำการพิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์ โดยมีการควบคุมปริมาณของหมึกให้เท่ากันทุกแผ่นด้วยการพิมพ์ตามรูปแบบที่แสดงในรูปที่ 3-1 จากนั้นทำการเก็บกระดาษเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ ก่อนนำมาทำการทดลองกำจัดหมึกโทนเนอร์ ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

3.2.1.2 นำกระดาษที่ผ่านการเก็บมาเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์แล้ว มาตัดโดยใช้เครื่องย่อยกระดาษ หลังจากนั้นแช่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน เพื่อให้กระดาษอ่อนตัวและง่ายต่อการตีกระจายเยื่อ นำกระดาษมาตีกระจายเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อ โดยให้มีความเข้มข้นของเยื่อ (pulp consistency) ร้อยละ 5 เพื่อให้อนุภาคของหมึกหลุดออกมาจากผิวหน้าของกระดาษ ซึ่งอัตราความเร็วรอบในการตีกระจายเยื่อมี 5 ระดับ และแต่ละระดับจะใช้ระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อต่างๆ กัน โดยจะเริ่มตีกระจายเยื่อจากความเร็วรอบต่ำไปสู่ความเร็วรอบสูง พร้อมช่วงเวลาการตีกระจายเยื่อตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3-2 โดยใช้คุณสมบัติที่ 50 องศาเซลเซียสตลอดช่วงการตีกระจายเยื่อ ในขั้นตอนนี้การตีกระจายเยื่อนี้จะมีการใส่สารลดแรงตึงผิวความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง มีการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในช่วงกรด (5 ± 0.2) โดยใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 และระหว่างการตีกระจายเยื่อ จะมีการหยุดเครื่องเพื่อกวนเยื่อทุกๆ 5 นาที ยกเว้นในช่วง 20 นาทีแรก เพื่อให้การตีกระจายเยื่อเป็นไปอย่างทั่วถึงและป้องกันกระดาษจับตัวเป็นก้อน

ตารางที่ 3-2 อัตราความเร็วรอบและระยะเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ

อัตราความเร็วรอบในการตีกระจายเยื่อ (รอบต่อนาที)	ระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อ (นาที)
100	20
250	5
300	10
350	10
400	75

3.2.1.3 นำเยื่อที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.2.1.2 มาทำการเจือจางให้มีความเข้มข้นของเยื่อประมาณร้อยละ 0.8 จากนั้นทำการแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน คือ เยื่อส่วนที่หนึ่งและเยื่อส่วนที่สอง โดยเยื่อส่วนที่หนึ่งไปวัดค่าสภาพระบายน้ำและขึ้นแผ่นทดสอบประมาณ 10 แผ่นตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 [22] ดังนั้นจึงจัดเป็นเยื่อที่ไม่ผ่านการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ส่วนเยื่อส่วนที่สองจะถูกนำไปกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำเยื่อที่ผ่านการกำจัดหมึกไปวัดค่าสภาพระบายน้ำและขึ้นแผ่นทดสอบประมาณ 10 แผ่นตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 [22]

3.2.1.4 นำแผ่นทดสอบของเยื่อส่วนแรกและแผ่นทดสอบของเยื่อส่วนที่สอง ไปทดสอบหาค่าสมบัติเชิงแสง เช่น ความขาวสว่าง ความทึบแสง ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ เป็นต้น และค่าสมบัติทางกายภาพ เช่น ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก เป็นต้น

3.2.1.5 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ

3.2.2 สภาวะที่ 2: การทดลองที่ใช้โคโทซาน

3.2.2.1 ทำการทดลองตามขั้นตอนการทดลองของการทดลองควบคุมทุกประการ ยกเว้นในขั้นตอนการกระจายเยื่อให้ทำการเติมโคโทซานชนิดที่ 1 ปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

3.2.2.2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอน 3.2.2.1 แต่เปลี่ยนปริมาณโคโทซานชนิดที่ 1 จากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ

3.2.2.3 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.2.2.1 - 3.2.2.2 แต่เปลี่ยนชนิดของโคโทซานเป็นโคโทซานชนิดที่ 2 และโคโทซานชนิดที่ 3 ตามลำดับ

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงพร้อมทั้งการวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 หาค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อที่ได้จากก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ โดยใช้เครื่องวัดค่าสภาพระบายน้ำดังแสดงในรูปที่ 3-2 ตามมาตรฐาน TAPPI T-227 om-04 [23]



รูปที่ 3-2 เครื่องวัดค่าสภาพระบายน้ำ (freeness tester)

3.3.2 นำแผ่นทดสอบไปวัดหาค่าความขาวสว่างตามมาตรฐาน T 525 om-06 [24] ความทึบแสงตามมาตรฐานของ TAPPI T 519 om-02 [25] ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ตามมาตรฐาน T 567 pm-97 [26] โดยจะทำการวัดทั้งด้านตะแกรง (wire side) และด้านผ้าสักหลาด (felt side) ด้านละ 5 จุด ซึ่งจะวัดทั้งแบบมีแผ่นทดสอบหลายแผ่นรองซ้อนกันและแบบที่มีวัตถุสีดำรองด้านใต้แผ่นทดสอบ โดยใช้เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (optical tester) ดังแสดงในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (optical tester)

3.3.4 นำแผ่นทดสอบไปหาน้ำหนักมาตรฐาน โดยน้ำหนักมาตรฐาน คือน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนมากมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรืออาจเรียกว่าแกรม ทำการวัดโดยนำแผ่นทดสอบมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหารพื้นที่ของแผ่นทดสอบ

3.3.5 นำแผ่นทดสอบไปวัดความหนา โดยความหนา คือระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบภายใต้ภาวะที่กำหนด โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหนาหน่วยที่วัดได้เป็นมิลลิเมตร

3.3.6 นำแผ่นทดสอบไปหาค่าความหนาแน่น (density) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากน้ำหนักมาตรฐาน ตามที่หาได้จากข้อ 3.3.4 มาหารด้วยความหนาของแผ่นทดสอบ ตามที่หาได้จากข้อ 3.3.5

3.3.6 นำแผ่นทดสอบไปวัดหาค่าสมบัติเชิงกล เช่น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงตามมาตรฐาน T 494 om-01 [27] ความต้านทานต่อแรงฉีกตามมาตรฐาน T 414 om-98 [28] และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุตามมาตรฐาน T 403 om-97 [29] ตามลำดับ โดยเครื่องทดสอบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง เครื่องทดสอบความต้านทานแรงฉีก และเครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ แสดงในรูปที่ 3-4 รูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6 ตามลำดับ



รูปที่ 3-4 เครื่องวัดค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile tester)



รูปที่ 3-5 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (tear tester)



รูปที่ 3-6 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst tester)

3.3.6 นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์สรุปผล โดยใช้หลักการการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ สองตัวแปร ซึ่งจะเป็นแบบ 2^2 factorial design ระดับของตัวแปร

ตารางที่ 3-3 การออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ สองตัวแปร

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับของตัวแปร	
		(-1)	(+1)
ปริมาณไคโทซาน (ร้อยละ)	A	0.1	1.0
น้ำหนักโมเลกุลของไคโทซาน	B	6500	32000

3.3.7 นำผลการทดลองสมบัติเชิงแสง สมบัติทางกายภาพ สภาพระบายน้ำ ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ ที่ดีที่สุดที่ได้จากภาวะการใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุมมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor

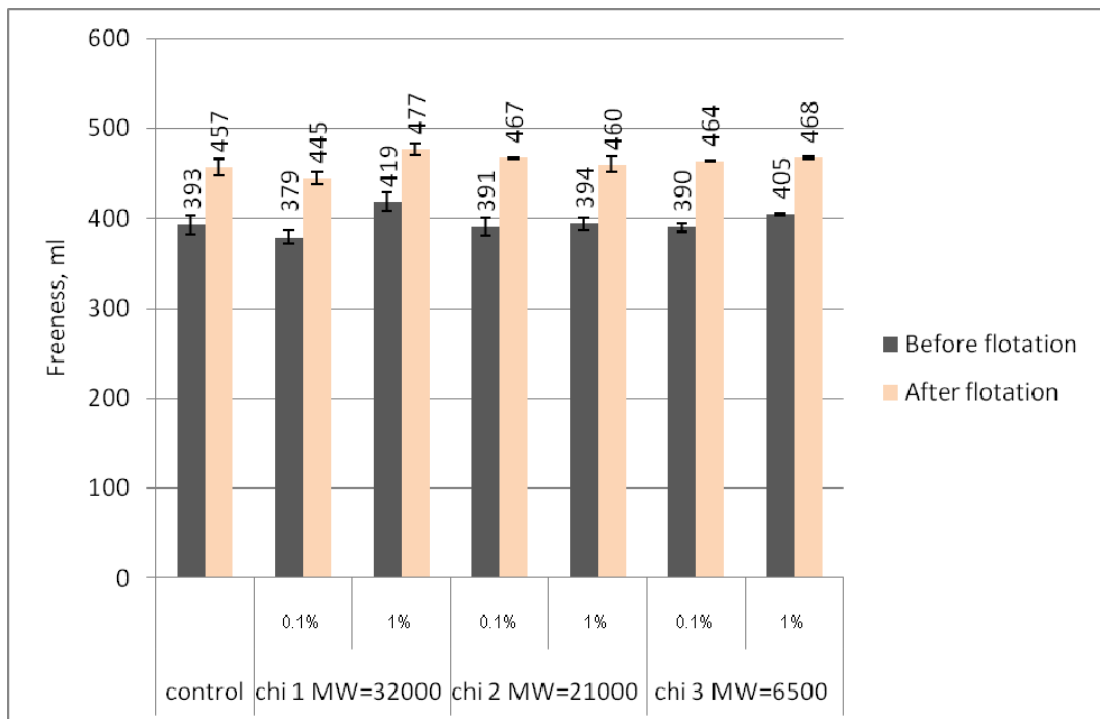
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่นำเสนอในบทนี้จะนำเสนอในรูปแบบของอิทธิพลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อค่าสภาพระบายน้ำและค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ รวมถึงต่อสมบัติเชิงแสง ได้แก่ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ และต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความต้านทานแรงฉีก โดยใช้ในการออกแบบแพคเกจจิ้งสองระดับ สองตัวแปร ในการหาความสำคัญของตัวแปรที่มีต่อสมบัติต่างๆ ที่ทำการศึกษา

4.1 สภาพระบายน้ำ (Freeness)

รูปที่ 4-1 แสดงผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อ ก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ



รูปที่ 4-1 ผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อ ก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นเยื่อจากการทดลองควบคุม รวมถึงเยื่อจากการทดลองโดยเติมโคโทซานชนิดต่างๆ ทั้งที่ปริมาณร้อยละ 0.1 และร้อยละ 1.0 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยสั้นบางส่วนอาจเกาะติดกับฟองอากาศพร้อมกับอนุภาคหมึกแล้วถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ ทำให้เยื่อส่วนที่ผ่านการกำจัดหมึกแล้วมีเส้นใยยาวเหลืออยู่ระบบมากกว่าเมื่อเทียบกับจำนวนเส้นใยสั้น ซึ่งเส้นใยยาวมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้ำไว้น้อยกว่าเส้นใยสั้น จึงส่งผลให้เยื่อที่มีเส้นใยยาวอยู่มากมีค่าสภาพระบายน้ำสูงกว่า

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการใช้โคโทซานต่อค่าสภาพระบายน้ำหลังการลอยฟองอากาศซึ่งเป็นค่าสภาพระบายน้ำที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าสภาพระบายน้ำหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้โคโทซานปริมาณร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ส่งผลทำให้ค่าสภาพระบายน้ำสูงกว่ากรณีที่เติมโคโทซานปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ยกเว้นโคโทซานชนิดที่ 2 ที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดกลาง ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะว่าโคโทซานมีประจุเป็นบวก ในขณะที่เส้นใยมีประจุเป็นลบ ดังนั้นการเติมโคโทซานในปริมาณที่สูง ทำให้เส้นใยมาเกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น ส่งผลให้เหลือพื้นที่ผิวในการดูดน้ำของเส้นใยลดลง จึงทำให้เส้นใยระบายน้ำออกได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้โคโทซานทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าสภาพระบายน้ำของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศพบว่า พบว่าโคโทซานชนิดที่ 1 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงสุด จะให้ค่าสภาพระบายน้ำสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโคโทซานอีกสองชนิด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าโคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ได้กลุ่มก้อนของเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ เส้นใยจึงเสียพื้นที่ผิวในการดูดน้ำมาก ส่งผลให้เส้นใยสามารถระบายน้ำออกได้มากขึ้น

เมื่อนำผลที่ดีที่สุดเมื่อใช้โคโทซานนี้ ซึ่งได้แก่ โคโทซานชนิดที่ 1 ที่ปริมาณร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองควบคุม พบว่า การใช้โคโทซานทำให้ค่าสภาพระบายน้ำที่ดีที่สุดสูงกว่าการทดลองควบคุม (477 ml เปรียบเทียบกับ 457 ml)

อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยเริ่มจากการพิจารณาเฉพาะการทดลองในกลุ่มที่ใช้โคโทซาน เมื่อพิจารณาค่าสภาพระบายน้ำหลังการลอยฟองอากาศโดยใช้หลักวิเคราะห์ทางสถิติการออกแบบแฟกทอเรียล จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-1 ซึ่งจากตารางพบว่า ปริมาณโคโทซานที่เติมลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อไม่มีผลต่อค่าสภาพระบายน้ำของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น (Probability; Prob) ของปริมาณของโคโทซานมีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้โคโทซานต่อค่าสภาพระบายน้ำของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	324	1	324	2.932127	0.2290	not significant
A	324	1	324	2.932127	0.2290	
Residual	221	2	110.5			
Cor Total	545	3				

หมายเหตุ A คือ ปริมาณโคโทซานที่ใช้

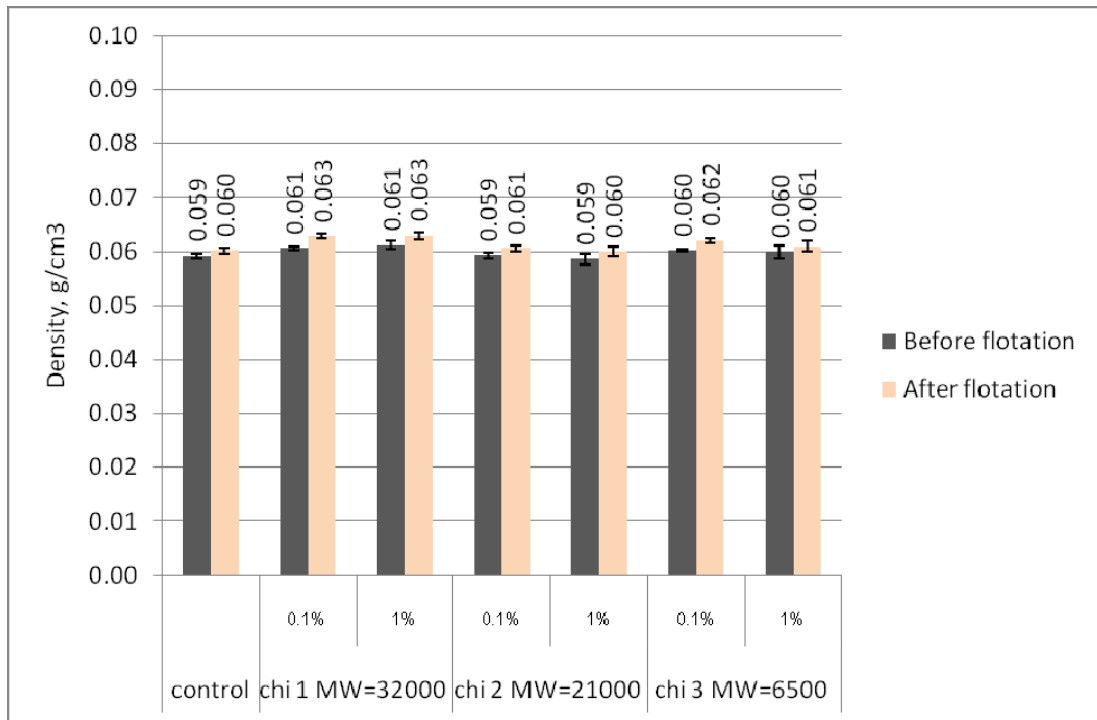
เมื่อนำค่าสภาพระบายน้ำหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุมมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า โคโทซานที่นำมาใช้ไม่ส่งผลต่อค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F-crit และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสภาพระบายน้ำหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุม

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	400	1	400	5.405405	0.145642	18.51282
Within Groups	148	2	74			
Total	548	3				

4.2 ความหนาแน่นของกระดาษ (Apparent density)

รูปที่ 4-2 แสดงผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ



รูปที่ 4-2 ผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบมีน้อยมาก ดังจะเห็นได้จากค่าความหนาแน่นต่ำสุดก่อนการลอยฟองอากาศจะอยู่ที่ 0.059 g/cm^3 ในขณะที่ค่าความหนาแน่นสูงสุดหลังการลอยฟองอากาศจะอยู่ที่ 0.063 g/cm^3 เท่านั้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการใช้โคโทซานต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า ปริมาณโคโทซานที่ใช้มีผลต่อความหนาแน่นน้อยมาก โดยความหนาแน่นมีค่าความแตกต่างกันอยู่เพียง 0.001 g/cm^3 เท่านั้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้โคโทซานทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ พบว่า ชนิดของ

อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลที่ดีที่สุดเมื่อใช้ไคโทซานนี้ ซึ่งได้แก่ ไคโทซานชนิดที่ 1 ที่ปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งไปเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม พบว่า การใช้ไคโทซานทำให้ค่าความหนาแน่นของกระดาษที่ดีที่สุดมีค่าแตกต่างจากการทดลองควบคุมเพียงเล็กน้อย (0.063 g/cm^3 เปรียบเทียบกับ 0.060 g/cm^3)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการออกแบบแฟกทอเรียล ดังแสดงในตารางที่ 4-3 พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของไคโทซานไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของน้ำหนักโมเลกุลของไคโทซานต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.0000025	2	0.00000125	5	0.3015	not significant
B	0.00000225	1	0.00000225	9	0.2048	
AB	0.00000025	1	0.00000025	1	0.5000	
Residual	0.00000025	1	0.00000025			
Cor Total	0.00000275	3				

หมายเหตุ A คือ ปริมาณไคโทซานที่ใช้ B คือ ชนิดของไคโทซาน

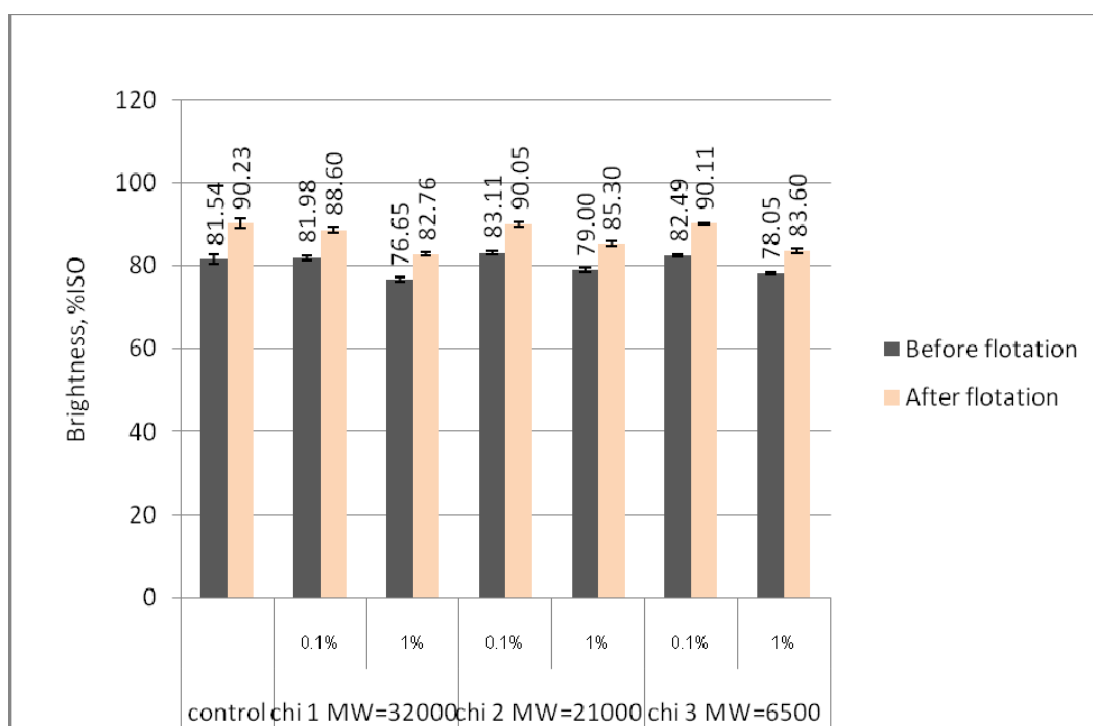
เมื่อนำค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุมมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่า ไคโทซานที่นำมาใช้ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F-crit และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุม

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	9E-06	1	9E-06	9	0.095466	18.51282
Within Groups	0.000002	2	0.000001			
Total	0.000011	3				

4.3 ความขาวสว่าง (Brightness)

รูปที่ 4-3 แสดงผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ



รูปที่ 4-3 ผลของน้ำหนักรวมและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็แผ่นทดสอบจากการทดลองควบคุม รวมถึงแผ่นทดสอบจากการ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศซึ่งเป็นค่าความขาวสว่างที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าความขาวสว่างหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า เมื่อมีการเติมไคโทซานลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าเมื่อเติมปริมาณไคโทซานร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไคโทซานทำหน้าที่เป็น collector จึงส่งผลให้หมึกรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและเกาะติดกับฟองอากาศมากขึ้น หากมีการใช้ไคโทซานในปริมาณที่มากเกินไป ขนาดกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกอาจมีขนาดใหญ่มาก ทำให้การเกาะติดของอนุภาคหมึกกับฟองอากาศเกิดขึ้นได้ไม่ดีนัก กล่าวคือ พื้นที่ผิวในการจับยึดของกลุ่มอนุภาคหมึกมีไม่เต็มผิวหน้าของกลุ่มอนุภาคหมึก ทำให้ไม่สามารถทนต่อแรงต่างๆ ที่พยายามแยกกลุ่มอนุภาคหมึกออกจากฟองอากาศ ในขณะที่ฟองอากาศที่มีอนุภาคหมึกเกาะติดอยู่ด้วยนี้พยายามลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ นอกจากนี้ยังเป็นเพราะว่าไคโทซานมีประจุเป็นบวก เส้นใยมีประจุเป็นลบ ทำให้เกิดการจับตัวกันได้ดีระหว่างไคโทซานกับเส้นใยด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากใช้ไคโทซานในปริมาณที่สูงเกินไป อาจทำให้ไคโทซานไปจับกับเส้นใยได้มาก จนกระทั่งไคโทซานไปจับกับอนุภาคหมึกได้น้อยลง ซึ่งอาจทำให้ค่าความขาวสว่างมีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้ไคโทซานทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าความขาวสว่างที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าความขาวสว่างหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า ไคโทซานชนิดที่ 3 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสุด ให้ค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับไคโทซานอีกสองชนิด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าไคโทซานที่มีขนาดเล็ก อาจให้กลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกที่มีขนาดเหมาะสมมากกว่า ในขณะที่ไคโทซานที่มีขนาดใหญ่ อาจให้กลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่เกินไป จนไปลดประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

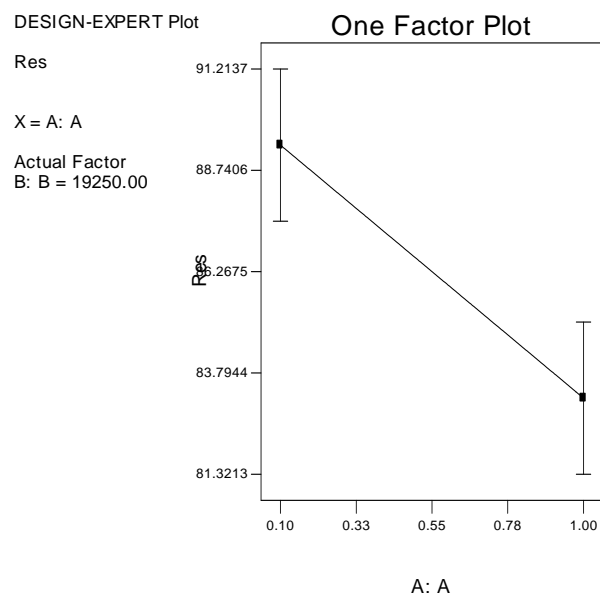
เมื่อนำผลที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ไคโทซาน ซึ่งได้แก่ กรณีที่ใช้ไคโทซานชนิดที่ 3 ปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองควบคุม พบว่าการทดลองควบคุมให้ค่าความขาวสว่างดีที่สุดสูงกว่าการทดลองที่ใช้ไคโทซานเพียงเล็กน้อย (90.23%ISO เปรียบเทียบกับ 90.11%ISO)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้หลังการลอยฟองอากาศไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการออกแบบแฟกทอเรียล พบว่า ปริมาณไคโทซานที่ใช้ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อมีผลต่อค่าความ

ตารางที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้โคโทซานต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	38.130625	1	38.130625	51.08434	0.0190	significant
A	38.130625	1	38.130625	51.08434	0.0190	
Residual	1.49285	2	0.746425			
Cor Total	39.623475	3				

หมายเหตุ A คือ ปริมาณโคโทซานที่ใช้ B คือ ชนิดของโคโทซาน



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ กับปริมาณโคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ

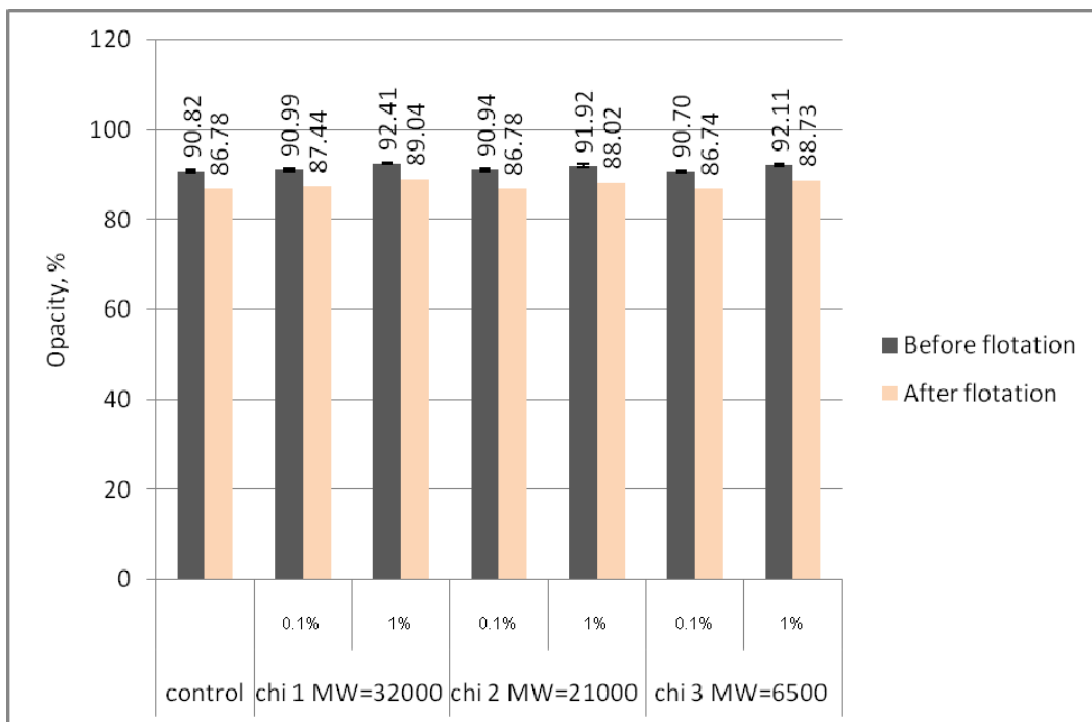
เมื่อนำค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุมมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-6 พบว่า ไคโทซานที่นำมาใช้ไม่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F-crit และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุม

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.013225	1	0.013225	0.011651	0.923897	18.51282
Within Groups	2.27025	2	1.135125			
Total	2.283475	3				

4.4 ความทึบแสง (Opacity)

รูปที่ 4-5 แสดงผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบ ก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ



รูปที่ 4-5 ผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าต่ำกว่าค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็แผ่นทดสอบจากการทดลองควบคุม รวมถึงแผ่นทดสอบจากการทดลองเติมโคโทซานชนิดต่างๆ ทั้งที่ปริมาณร้อยละ 0.1 และร้อยละ 1.0 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคของหมึกที่หลุดออกมาจากผิวหน้าของเส้นใยในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อจะเกาะติดกับฟองอากาศแล้วถูกกำจัดออกไปกับฟองอากาศ เมื่อแผ่นทดสอบเหลืออนุภาคหมึกน้อยลง การดูดกลืนแสงโดยอนุภาคหมึกลดน้อยลง ทำให้ความทึบแสงลดลงตามไปด้วย ซึ่ง ความทึบแสงเป็นการวัดความสามารถในการให้แสงทะลุของแผ่นทดสอบ แผ่นทดสอบที่มีความทึบแสงสูงจะมีการทะลุผ่านของแสงน้อย นอกจากนี้อีกเหตุผลหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้ก็คือ การลอย

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าความทึบแสงหลังการลอยฟองอากาศซึ่งเป็นค่าความทึบแสงที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าความทึบแสงหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า เมื่อมีการเติมไคโทซานลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ค่าความทึบแสงต่ำกว่าเมื่อเติมปริมาณไคโทซานร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า การใช้ไคโทซานในปริมาณน้อยสามารถกำจัดหมึกออกได้ดีกว่าเมื่อแผ่นทดสอบเหลืออนุภาคหมึกน้อยลง การดูดกลืนแสงโดยอนุภาคหมึกลดน้อยลง ทำให้ความทึบแสงลดลงตามไปด้วย และนอกจากนี้การใช้ไคโทซานในปริมาณน้อยยังทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของเส้นใยในขนาดเล็กและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่า ส่งผลให้เส้นใยมีการแนบชิดกันได้มากกว่า ซึ่งอาจส่งผลให้การกระเจิงแสงทำได้น้อยลง ความทึบแสงจึงลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้ไคโทซานทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าความทึบแสงหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าความทึบแสงที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าความทึบแสงหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า ไคโทซานชนิดที่ 3 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสุด ให้ค่าความทึบแสงหลังการลอยฟองอากาศต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับไคโทซานอีกสองชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไคโทซานที่มีขนาดเล็ก อาจให้กลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกที่มีขนาดเหมาะสมมากกว่า หมึกจึงถูกกำจัดออกไปได้มากกว่า เมื่อแผ่นทดสอบเหลืออนุภาคหมึกน้อยลง การดูดกลืนแสงโดยอนุภาคหมึกลดน้อยลง ทำให้ความทึบแสงลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ไคโทซานที่มีขนาดเล็กนี้จะให้กลุ่มก้อนของเส้นใยที่มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดีกว่า เส้นใยมีการสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีกว่า การแนบชิดของเส้นใยมีมากกว่า ค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบจึงลดลง

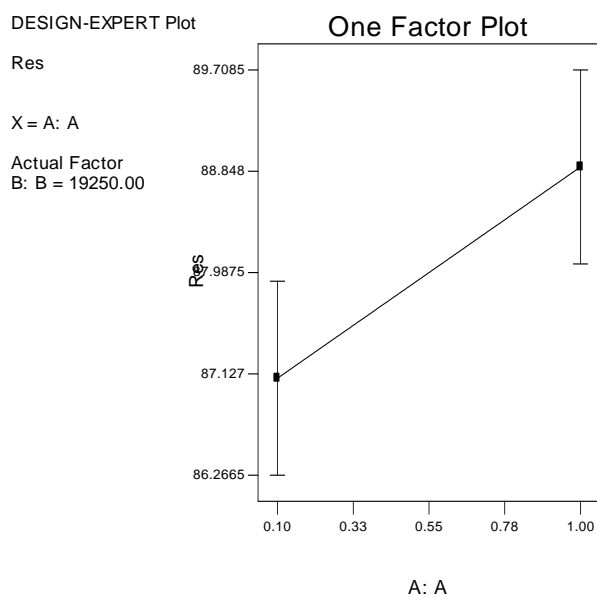
เมื่อนำผลที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ไคโทซาน ซึ่งได้แก่ กรณีที่ใช้ไคโทซานชนิดที่ 3 ปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองควบคุม พบว่าการทดลองที่ใช้ไคโทซานให้ค่าความทึบแสงไม่แตกต่างจากการทดลองควบคุมเท่าไรนัก (86.74%ISO เปรียบเทียบกับ 86.78%ISO)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการออกแบบแฟกทอเรียล พบว่า ปริมาณการใช้ไคโทซานในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อมีผลต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น (probability; Prob) ดังแสดงในตารางที่ 4-7 มีค่าน้อยกว่า 0.05 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	3.222025	1	3.222025	21.98959	0.0426	significant
A	3.222025	1	3.222025	21.98959	0.0426	
Residual	0.29305	2	0.146525			
Cor Total	3.515075	3				

หมายเหตุ A คือ ปริมาณไคโทซานที่ใช้



รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศกับปริมาณไคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศกับปริมาณไคโทซานในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ดังแสดงในรูปที่ 4-6 พบว่า ค่าความทึบแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ไคโทซานในปริมาณมากในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ซึ่งผลที่ได้จะมีความสอดคล้องและสนับสนุนผลการทดลองในเบื้องต้น

เมื่อนำค่าความทึบแสงหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ไคโทซานกับการทดลองควบคุมมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor ดังแสดงใน

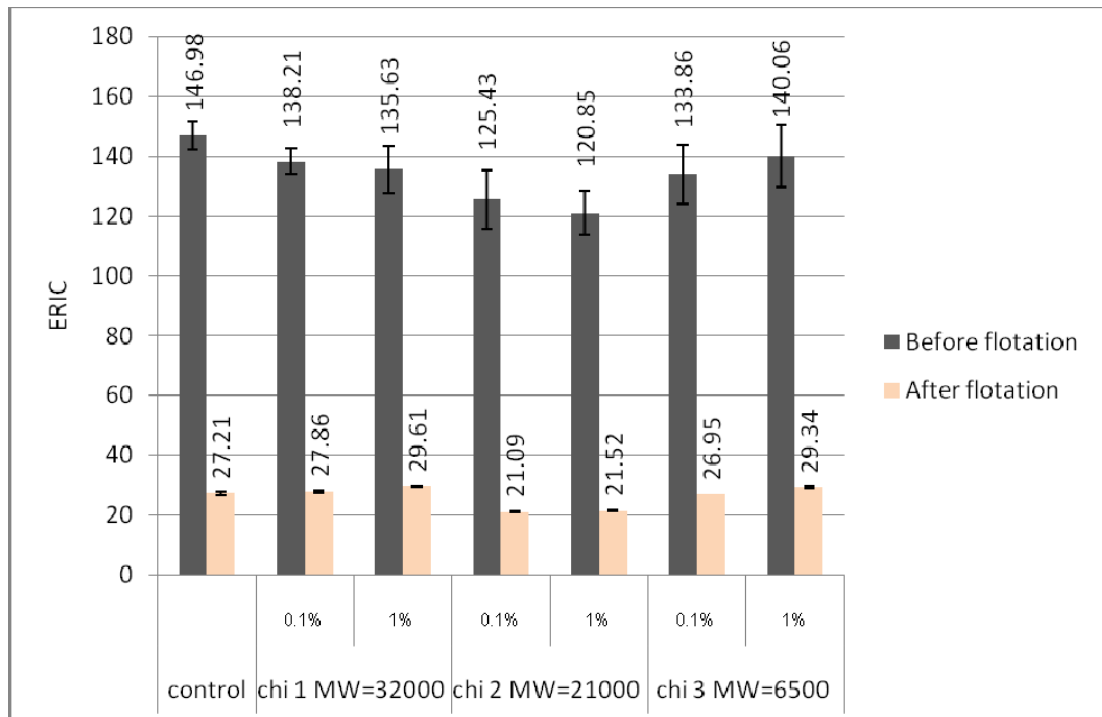
ตารางที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความทึบแสงหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุม

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.002025	1	0.002025	0.010221	0.928695	18.51282
Within Groups	0.39625	2	0.198125			
Total	0.398275	3				

4.5 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration, ERIC)

รูปที่ 4-7 แสดงผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าต่ำกว่าค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็แผ่นทดสอบจากการทดลองควบคุม รวมถึงแผ่นทดสอบจากการทดลองเติมโคโทซานชนิดต่างๆ ทั้งที่ปริมาณร้อยละ 0.1 และร้อยละ 1.0 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากอนุภาคของหมึกที่ถูกตีแยกออกจากเส้นใยจะไปเกาะติดกับฟองอากาศ และถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศในที่สุด



รูปที่ 4-7 ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศซึ่งเป็นค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ที่น่าไปใช้จริง เพราะเป็นค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้วพบว่า เมื่อมีการเติมไคโทซานลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ต่ำกว่าเมื่อเติมปริมาณไคโทซานร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความขาวสว่าง โดยที่ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่จะแปรผกผันกับค่าความขาวสว่าง หากค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่น้อยลง จะส่งผลให้ค่าความขาวสว่างสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากไคโทซานทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมอนุภาคหมึกทำให้สามารถกำจัดหมึกออกไปได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากมีการใช้ไคโทซานในปริมาณที่มากเกินไป ขนาดกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกอาจมีขนาดใหญ่มาก ทำให้การเกาะติดของอนุภาคหมึกกับฟองอากาศเกิดขึ้นได้ไม่ดึ้นัก ทำให้ไม่สามารถทนต่อแรงต่างๆ ที่พยายามแยกกลุ่มอนุภาคหมึกออกจากฟองอากาศ นอกจากนี้ยังอาจเป็นเพราะว่าไคโทซานมีประจุเป็นบวก เส้นใยมีประจุเป็นลบ การใช้ไคโทซานมากเกินไปไคโทซานอาจมีแนวโน้มไปจับกับเส้นใยมากขึ้นและไปจับกับอนุภาคหมึกน้อยลง จึงส่งผลให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในระบบเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้ไคโทซานทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าที่น่าไปใช้จริง เพราะเป็นค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

เมื่อนำผลที่ดีที่สุดเมื่อใช้โคโทซานนี้ ซึ่งได้แก่ โคโทซานชนิดที่ 2 ที่ปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งไปเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม พบว่า การใช้โคโทซานทำให้ค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่ที่ดีที่สุดต่ำกว่าการทดลองควบคุม (21.09 เปรียบเทียบกับ 27.21)

เมื่อพิจารณาค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่ในแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ โดยใช้หลักวิเคราะห์ทางสถิติการออกแบบแฟกทอเรียล จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-9

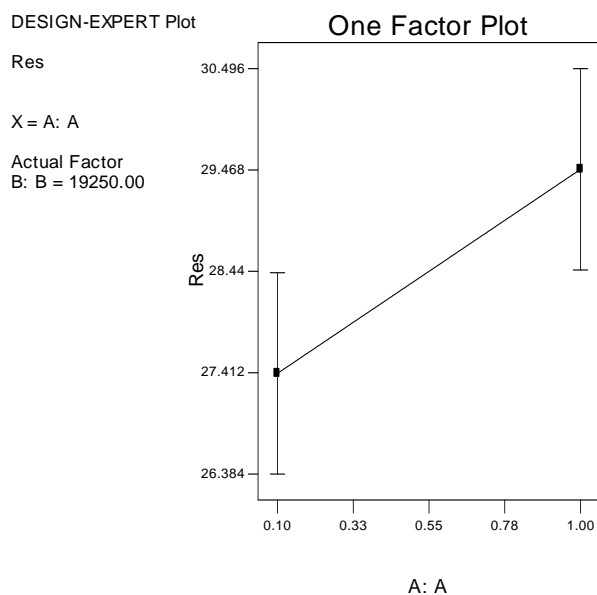
ตารางที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้โคโทซานต่อค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	4.2849	1	4.2849	19.02286	0.0488	significant
A	4.2849	1	4.2849	19.02286	0.0488	
Residual	0.4505	2	0.22525			
Cor Total	4.7354	3				

หมายเหตุ A คือ ปริมาณโคโทซานที่ใช้

จากตารางพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่ในแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ คือ ปริมาณโคโทซานที่เติมลงไปในช่วงตอนการตีกระจายเยื่อเท่านั้น ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 โดยจะให้ค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่า 0.05

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความปริมาณหมักที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศกับปริมาณโคโทซานในช่วงตอนการตีกระจายเยื่อ ดังแสดงในรูปที่ 4-8 พบว่า การเติมโคโทซานลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อในปริมาณน้อยๆ แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการลอยฟองอากาศ และเมื่อนำไปขึ้นรูปแผ่นทดสอบจะได้แผ่นทดสอบที่มีค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่น้อย



รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศกับปริมาณของโคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ

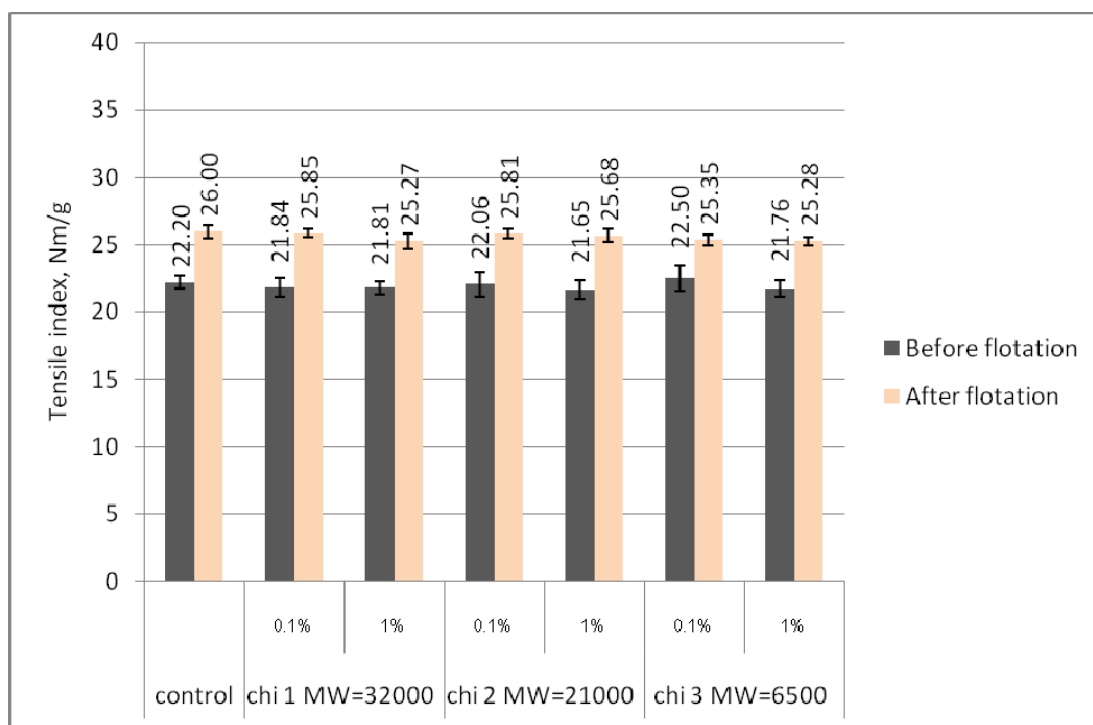
เมื่อนำค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุมมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-10 พบว่า โคโทซานที่นำมาใช้ไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F-crit และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุม

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	37.3321	1	37.3321	13.30225	0.067637	18.51282
Within Groups	5.6129	2	2.80645			
Total	42.945	3				

4.6 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

รูปที่ 4-9 แสดงผลของชนิดและปริมาณของโคโโทซานที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ



รูปที่ 4-9 ผลของชนิดและปริมาณของโคโโทซานที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็แผ่นทดสอบจากการทดลองควบคุม รวมถึงแผ่นทดสอบจากการทดลองเติมโคโโทซานชนิดต่างๆ ทั้งที่ปริมาณร้อยละ 0.1 และร้อยละ 1.0 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยที่มีขนาดสั้นถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศในระหว่างการลอยฟองอากาศ จึงทำให้เยื่อที่ผ่านการกำจัดหมึกออกแล้วเหลือเส้นใยยาวอยู่เป็นจำนวนมาก โดยปกติแล้วเส้นใยยาวมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยสั้น และเส้นใยยาวยังสามารถสร้างพันธะระหว่างเส้นใยได้มากกว่าเส้นใยสั้น จึงส่งผลให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้หลังจากการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการใช้โคโทซานต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้โคโทซานปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ส่งผลทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบสูงกว่ากรณีที่ใช้โคโทซานปริมาณร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่เป็นเช่นนี้อาจอธิบายได้ว่าเพราะโคโทซานมีประจุบวก ในขณะที่เส้นใยมีประจุลบ ทำให้โคโทซานและเส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดี โคโทซานจึงทำให้เส้นใยเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน (flocculation) ซึ่งถ้ากลุ่มก้อนของเส้นใยนั้นมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดี อาจส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้โคโทซานในปริมาณที่สูงเกินไป อาจทำให้กลุ่มก้อนของเส้นใยมีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากเกินไป ทำให้กลุ่มของเส้นใยมีการกระจายตัวในแผ่นทดสอบได้ไม่ดี ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้โคโทซานทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ พบว่า โคโทซานชนิดที่ 1 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงสุดจะให้ค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ไม่แตกต่างจากผลที่ได้จากโคโทซานที่เหลืออีก 2 ชนิดเท่าไรนัก

เมื่อนำผลที่ดีที่สุดเมื่อใช้โคโทซานนี้ ซึ่งได้แก่ โคโทซานชนิดที่ 1 ที่ปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ไปเปรียบเทียบกับกระดาษทดลองควบคุม พบว่า การใช้โคโทซานทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ดีที่สุดมีค่าต่ำกว่าการทดลองควบคุมเล็กน้อย (26.00 Nm/g เปรียบเทียบกับ 25.85 Nm/g)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการออกแบบแฟกทอเรียล พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่เติมลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีผลทางสถิติมาแสดงดังตารางอื่นๆข้างต้น

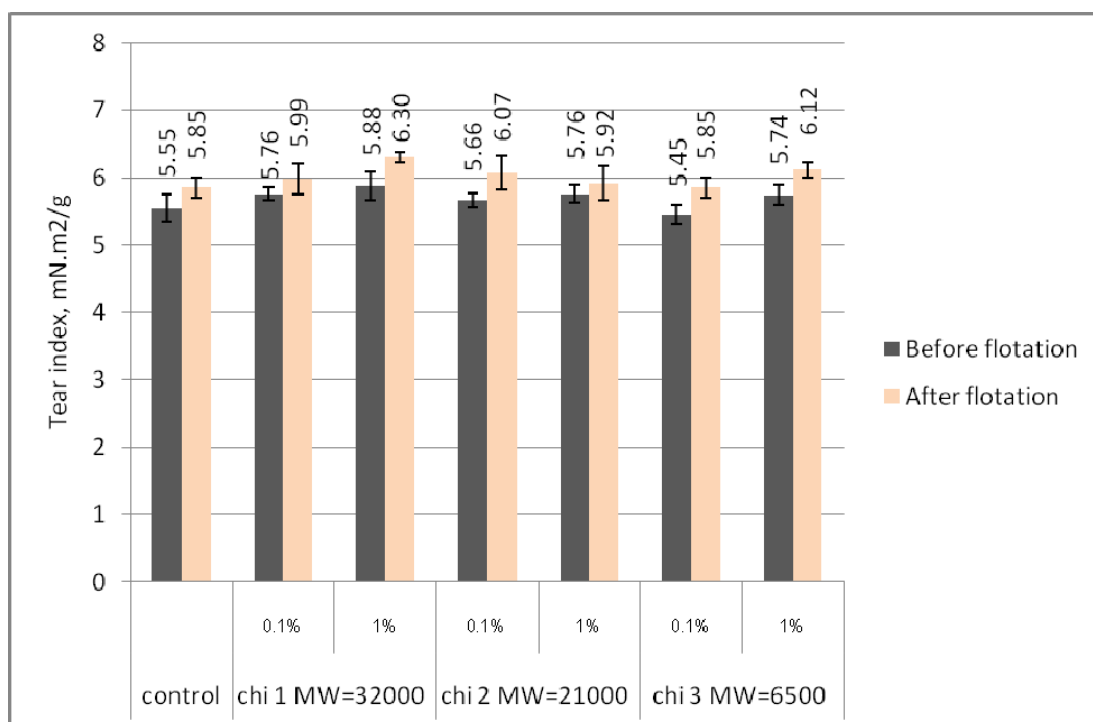
เมื่อนำค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุม มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่า โคโทซานที่นำมาใช้ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F-crit และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้โคโชนากับการทดลองควบคุม

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.024025	1	0.024025	0.944936	0.433548	18.51282
Within Groups	0.05085	2	0.025425			
Total	0.074875	3				

4.7 ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index)

รูปที่ 4-10 แสดงผลของชนิดและปริมาณของโคโชนที่มีต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ



รูปที่ 4-10 ผลของชนิดและปริมาณของโคโชนที่มีต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็แผ่นทดสอบจากการทดลองควบคุม รวมถึงแผ่นทดสอบจากการทดลองเติมโคโโซานชนิดต่างๆ ทั้งที่ปริมาณร้อยละ 0.1 และร้อยละ 1.0 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเส้นใยสั้นบางส่วนอาจถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศทำให้เหลือเส้นใยยาวอยู่มากกว่าเมื่อเทียบกับจำนวนเส้นใยสั้น โดยปกติแล้วความต้านทานแรงฉีก เป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใย โดยอิทธิพลของความแข็งแรงของเส้นใยจะมีสูงกว่าพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งโดยปกติแล้วเส้นใยยาวมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยสั้น เมื่อเยื่อในระบบเหลือเส้นใยยาวมากกว่าเส้นใยสั้น แผ่นทดสอบที่ผลิตได้จึงมีค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการใช้โคโโซานต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้โคโโซานปริมาณร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ส่งผลทำให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบสูงกว่ากรณีที่เติมโคโโซานปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ยกเว้นโคโโซานชนิดที่ 2 ที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดกลาง ซึ่งผลที่ได้ค่อนข้างเป็นไปได้ ในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะว่าการเติมโคโโซานในปริมาณที่สูง ทำให้เส้นใยเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน (flocculation) มากขึ้น สามารถต้านทานแรงฉีกอาจเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกมากขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้โคโโซานทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ พบว่า พบว่าโคโโซานชนิดที่ 1 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงสุด จะให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโคโโซานอีกสองชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก โคโโซานที่มีขนาดใหญ่ อาจทำให้ได้กลุ่มก้อนของเส้นใยขนาดใหญ่ ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงฉีกดี

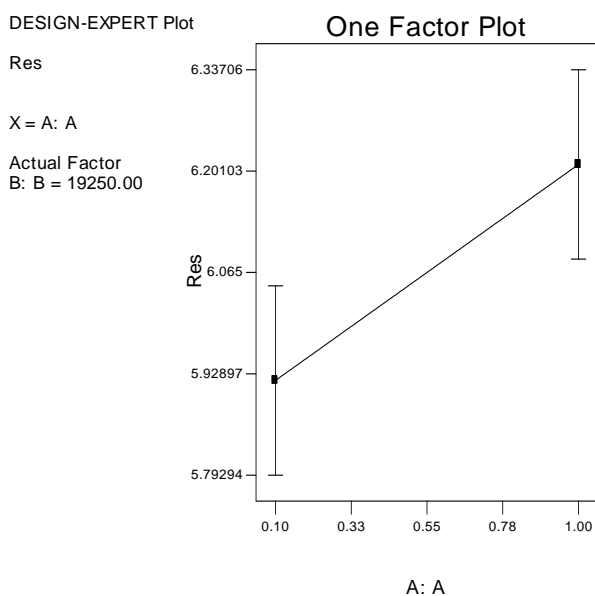
เมื่อนำผลที่ดีที่สุดเมื่อใช้โคโโซานนี้ ซึ่งได้แก่ โคโโซานชนิดที่ 1 ที่ปริมาณร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้งไปเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม พบว่า การใช้โคโโซานทำให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกที่ดีที่สุดมีค่าสูงกว่าการทดลองควบคุม ($6.30 \text{ mN m}^2/\text{g}$ เปรียบเทียบกับ $5.85 \text{ mN m}^2/\text{g}$)

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความต้านทานแรงหลังการลอยฟองอากาศ โดยใช้หลักวิเคราะห์ทางสถิติการออกแบบแฟกทอเรียล จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-12 จากการทดลองพบว่าชนิดของโคโโซานที่เติมลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ไม่มีผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบ

ตารางที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณการใช้โคโทซานต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.1097	2	0.05485	137.125	0.0603	not significant
A	0.0841	1	0.0841	210.25	0.0438	
B	0.0256	1	0.0256	64	0.0792	
Residual	0.0004	1	0.0004			
Cor Total	0.1101	3				

หมายเหตุ A คือ ปริมาณโคโทซานที่ใช้ B คือ ชนิดของโคโทซาน



รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศกับปริมาณของโคโทซานที่เติมในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ

เมื่อนำผลไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้โคโทซานกับค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4-11 พบว่า การเติมโคโทซานลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อในปริมาณน้อยๆ จะได้แผ่นทดสอบที่มีค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกน้อยกว่ากรณีที่เติมโคโทซานในปริมาณมากๆ ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลอง

เมื่อนำค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุม มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า โคโทซานที่นำมาใช้ส่งผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F-crit และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

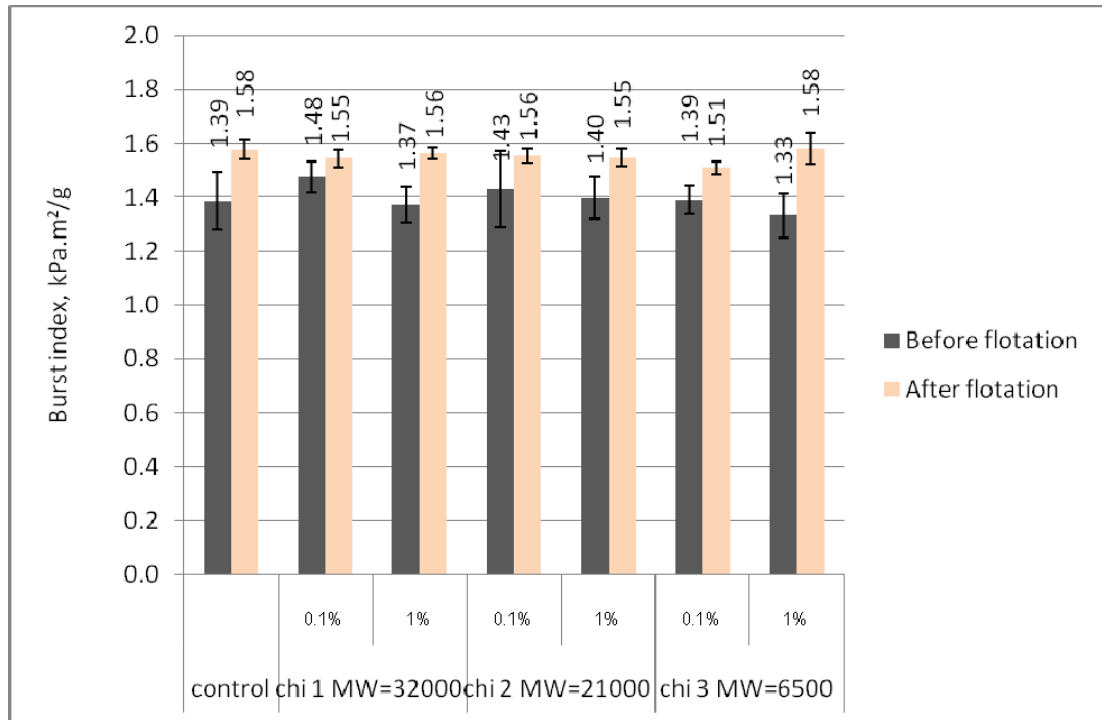
ตารางที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุม

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.2025	1	0.2025	25.3125	0.037309	18.51282
Within Groups	0.016	2	0.008			
Total	0.2185	3				

4.8 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst index)

รูปที่ 4-12 แสดงผลของชนิดและปริมาณของโคโทซานที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็แผ่นทดสอบจากการทดลองควบคุม รวมถึงแผ่นทดสอบจากการทดลองเติมโคโทซานชนิดต่างๆ ทั้งที่ปริมาณร้อยละ 0.1 และร้อยละ 1.0 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยที่มีขนาดสั้นถูกกำลังออกไปพร้อมกับฟองอากาศในระหว่างการลอยฟองอากาศ จึงทำให้เหลือแต่เส้นใยยาวอยู่เป็นจำนวนมาก โดยปกติแล้วเส้นใยยาวมี



รูปที่ 4-12 ผลของชนิดและปริมาณของไคโทซานที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการใช้ไคโทซานต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า ปริมาณไคโทซานที่ใช้แทบไม่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ โดยจะเห็นได้จากค่าที่แตกต่างกันมากที่สุด คือ ในกรณีของไคโทซานชนิดที่ 3 หากแต่ความต่างต่างนั้นมีค่าเพียง 0.07 (ที่ปริมาณไคโทซานร้อยละ 0.01 มีค่าเท่ากับ 1.51 kPa m²/g ในขณะที่ปริมาณไคโทซานร้อยละ 1.0 มีค่าเท่ากับ 1.58 kPa m²/g) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้ไคโทซานทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ พบว่า ชนิดของไคโทซานแทบจะไม่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเช่นเดียวกัน เนื่องจากค่าที่ได้มีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยหากเปรียบเทียบในกรณีที่ใช้ไคโทซานที่ปริมาณร้อยละ 0.1 จะได้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดัน

อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลที่ดีที่สุดเมื่อใช้โคโทซานนี้ ซึ่งได้แก่ โคโทซานชนิดที่ 3 ที่ปริมาณร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ไปเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม พบว่า การใช้โคโทซานทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับการทดลองควบคุม (1.58 kPa m²/g) เปรียบเทียบกับ 1.58 kPa m²/g)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการออกแบบแฟกทอเรียล พบว่า ปริมาณการใช้โคโทซานในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อไม่มีผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น (Probability; Prob) ดังแสดงในตารางที่ 4-14 มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้โคโทซานต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.0016	1	0.0016	3.2	0.2155	not significant
A	0.0016	1	0.0016	3.2	0.2155	
Residual	0.001	2	0.0005			
Cor Total	0.0026	3				

หมายเหตุ A คือ ปริมาณโคโทซานที่ใช้

เมื่อนำค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ใช้โคโทซานกับการทดลองควบคุมมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-15 พบว่า โคโทซานที่นำมาใช้ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F-crit และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบ
หลังการลอยฟองอากาศที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้โคโชนานกับการทดลองควบคุม

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0	1	0	0	1	18.51282
Within Groups	0.0164	2	0.0082			
Total	0.0164	3				

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลของไคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมักโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 สภาวะ โดยสภาวะที่ 1 นั้นเป็นการทดลองควบคุม (ไม่ใส่ไคโทซาน) ซึ่งเป็นการกำจัดหมักโทนเนอร์ออกจากกระดาดด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยมีการใช้ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ $\text{pH } 5 \pm 0.2$ ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ส่วนของการทดลองสภาวะที่ 2 นั้น เป็นการทดลองที่มีการใส่ไคโทซานลงในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ โดยใช้ค่าความเป็นกรด-เบสในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อเท่ากับ $\text{pH } 5 \pm 0.2$ ซึ่งการที่เลือกใช้ค่าความเป็นกรดเบสในช่วงนี้ทั้งในกรณีการทดลองควบคุม (ไม่ใส่ไคโทซาน) และการทดลองที่มีการใส่ไคโทซานนั้น เนื่องจากไคโทซานสามารถละลายในสภาวะกรดเท่านั้น ส่วนอุณหภูมิและเวลาในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อนั้นกำหนดให้ใช้ค่าเดียวกันสำหรับการทดลองทั้งสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณของไคโทซาน น้ำหนักโมเลกุลของไคโทซาน เพื่อดูถึงอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมักโทนเนอร์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การกำจัดหมักพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมีต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ดังนี้ ทำให้ค่าความทึบแสงและค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความขาวสว่าง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความต้านทานแรงฉีก ค่าสภาพระบายน้ำ และค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลอยฟองอากาศ

5.1.2 อิทธิพลของปริมาณไคโทซานจะส่งผลต่อค่าความขาวสว่าง ค่าความทึบแสง ค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่ และดัชนีความต้านทานแรงฉีกหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะไม่ส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ค่าสภาพระบายน้ำ และค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญ โดยถ้าเติมไคโทซานในปริมาณที่มากทำให้ค่าความขาวสว่างน้อยลง ค่าความทึบแสงมากขึ้น ค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่มากขึ้น และดัชนีความต้านทานแรงฉีกมากขึ้น

5.1.3 อิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของโคโทซานไม่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่าง ค่าความทึบแสง ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความต้านทานแรงฉีก ค่าสภาพระบายน้ำ และค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

5.2.1 ควรมีการศึกษาถึงผลของโคโทซานที่มีต่อลักษณะของเส้นใย อาทิเช่น การเกาะเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มก้อนของเส้นใยมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงแสงของแผ่นทดสอบ

5.2.2 ควรทดลองใช้โคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันมากๆ เช่น 100,000 50,000 และ 10,000 เป็นต้น เนื่องจากโคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันมากๆ อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโทเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

5.2.3 ควรทดลองใช้โคโทซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสีทิลที่แตกต่างกัน เช่น ร้อยละ 90 ร้อยละ 80 และร้อยละ 70 เป็นต้น เนื่องจากระดับการกำจัดหมู่แอสีทิลที่แตกต่างกัน อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโทเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

5.2.4 ควรทดลองปรับสภาพความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในช่วงเบส (pH 11 ± 0.2) ในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

รายการอ้างอิง

- [1] Gottsching, L. and Pakarinen, H. Papermaking Science and Technology 7: Recycled Fiber and Deinking. Atlanta: TAPPI PRESS, 2000.
- [2] Ferguson, L.D. Deinking chemistry: part 2. TAPPI Journal 75(8), 1992: 49-58.
- [3] Larsson, A., Surface Chemistry in Flotation Deinking. Paper Technology and Industry. 28(2), 1987, 388-390.
- [4] Blain, T.J., The Process of Flotation Deinking. 1992 Contaminant Problems Seminar, TAPPI Press, Atlanta, GA, 1992, 113.
- [5] Ferguson, L.D., Flotation Deinking Chemistry, 1994 Deinking Short Course. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1994, 227.
- [6] McCool, M.A., and Silveri, L., Removal of Specs and Non-Dispersed Ink from a De-inking Furnish. TAPPI Journal, 70(11), 1987, 75-59.
- [7] Linck, E., and Britz, H., Ink and Speck Removal Efficiency-A Matter of the Right Flotation Cells. 1990 Pulping Conference, TAPPI Press, Atlanta, GA, 123-131.
- [8] Ferguson, L.D. Deinking chemistry: part 1. TAPPI Journal 75(8), 1992: 75-83.
- [9] Berg, S.R., Johnson, D.A. and Thompson, E.V., Toner Detachment During Repulping of Laser-Printed Office Copy Paper. TAPPI Journal 80(4) 1997: 171-179.
- [10] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2543. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไคติน-ไคโทซาน กรุงเทพมหานคร.
- [11] Gunter, P. The Shrimps Cluster, <http://www3.wind.ne.jp>., Accessed date: April 5, 2010.
- [12] เขาวภา ไหวพริบ. 2534. การผลิตไคตินและไคโทซานจากเปลือกกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] Muzzarelli, R.A.A. Chitin. Oxford : Pergamon Press, 1977.
- [14] Miyoshi, H., Shimura, K., and Kasuki, O. Characterization of Some Fungal Chitosan. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 56 (12) 1992, 1901-1905.
- [15] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2543. การประยุกต์ใช้ไคติน-ไคโทซาน กรุงเทพมหานคร.
- [16] พอลิเมอรัซิวภาพกับการวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์, เดลินิวส์ (8 สิงหาคม 2542).

- [17] Chen, Y. M., Liu, J.C., and Ju, Y.-H., Flotation Removal of Algae from Water, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 12 (1), 1998, 49-55.
- [18] Lertsutthiwong, P., Chandkrachang, S., Nazhad, M.M., and Steven, W., Chitosan as a Dry Strength Agent for Paper, Appita Journal, 55 (3), 2002, 208-212.
- [19] Laleg, M. and Pikulik, I.I., Wet-Web Strength Increase by Chitosan, 1990 Papermakers Conference Proceeding, 1990, 101-106.
- [20] Sheridan, G.P., Rohlf, E.A. and Aston, D., Preventing Redeposition of Ink in A Deinking Operation Means Improved Recycled Fibre, Pulping Conference Proceeding, 1992, 487-492.
- [21] ปนัดดา กลิ่นบัว, การใช้ไคโตซานและเซลลูโลสในการกำจัดหมึกจากกระดาษที่พิมพ์ด้วยโทนเนอร์ด้วยวิธีลอยฟองอากาศ, วิทยานิพนธ์, หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [22] ISO. 5269/2-1980, Pulp Preparation of Laboratory Sheets for Physical Testing, Part 2, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2005.
- [23] T-227 om-04, Freeness of Pulp (Canadian Standard Method). TAPPI Press, Georgia, 2002.
- [24] T 525 om-06, Diffuse Brightness of Paper, Paperboard and Pulp (d/0), TAPPI Press, Georgia, 2002.
- [25] T 519 om-02, Diffuse Opacity of Paper (d/0 Paper Backing), TAPPI Press, Georgia, 2002.
- [26] T 567 pm-97, Determination of Effective Residual Ink Concentration by Infrared Reflectance Measurement, TAPPI Press, Georgia, 2002.
- [27] T 494 om-01, Tensile Properties of Paper and Paperboard (Using Constant Rate of Elongation Apparatus), TAPPI Press, Georgia, 2002.
- [28] T 403 om-97, Bursting Strength of Paper, TAPPI Press, Georgia, 2002
- [29] T 414 om-98, Internal Tearing Resistance of Paper (Elmendorf-Type Method), TAPPI Press, Georgia, 2002.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

ปริมาณความชื้นในกระดาษ

ทำการแบ่งตัวอย่างกระดาษออกเป็น 2 ชุด นำมาชั่งน้ำหนักก่อนอบได้ 2.391 กับ 2.065 กรัม ใส่ในตู้อบทิ้งไว้จนกว่าน้ำหนักของกระดาษจะคงที่ จากนั้นนำกระดาษมาชั่งน้ำหนักหลังอบได้ 2.292 กับ 1.991 กรัม คำนวณหาปริมาณความชื้นโดยใช้สูตร

$$\%MC = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกระดาษหลังอบ}}{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ}} \times 100$$

$$\text{ชุดแรก } \%MC = \frac{2.391 - 2.292}{2.391} \times 100 = 4.14 \%$$

$$\text{ชุดสอง } \%MC = \frac{2.065 - 1.991}{2.065} \times 100 = 3.58 \%$$

นำค่าที่ได้ทั้งสองชุดมาหาค่าเฉลี่ยทำให้ทราบปริมาณความชื้นในกระดาษซึ่งจะเท่ากับ 3.86 %

น้ำหนักเยื่อแห้ง

กระดาษที่นำมาใช้ในการทดลองแต่ละสภาวะมีจำนวน 45 แผ่น มีน้ำหนักรวม 233.38 กรัม กระดาษมีความชื้น 3.86% เราสามารถคำนวณน้ำหนักเยื่อแห้งได้จาก

$$\text{ปริมาณน้ำที่อยู่ในกระดาษ} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษทั้งหมด} \times \% \text{ความชื้นของกระดาษ}}{100}$$

$$\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} = \text{น้ำหนักกระดาษทั้งหมด} - \text{ปริมาณน้ำที่อยู่ในกระดาษ}$$

$$\frac{233.38 \times 3.86}{100} = 9.01 \text{ กรัม}$$

มีปริมาณน้ำอยู่ในกระดาษเท่ากับ 9.01 กรัม

เพราะฉะนั้นจะมีน้ำหนักเยื่อแห้ง $233.38 - 9.01 = 224.37$ กรัม

ปริมาณการเติมน้ำเพื่อให้เยื่อมีความเข้มข้น 5 %

ซึ่งจะคำนวณได้จากสูตร

$$\begin{aligned} \% \text{ consistency} &= \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง}}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100 \\ 5 &= \frac{224.37}{224.37 + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100 \end{aligned}$$

น้ำหนักน้ำที่ต้องเติม = 4263.03 กรัม แต่ในกระดาษมีความชื้น (ปริมาณน้ำ) อยู่แล้ว 9.01 กรัม
เพราะฉะนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเติมจริง $4263.03 - 9.01 = 4254.02$ กรัม

การคำนวณปริมาณการเติมน้ำเพื่อให้เยื่อมีความเข้มข้น 0.8 %

ซึ่งจะคำนวณได้จากสูตร

$$\begin{aligned} \% \text{ consistency} &= \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง}}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100 \\ 0.8 &= \frac{224.37}{224.37 + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100 \end{aligned}$$

น้ำหนักน้ำที่ต้องเติม = 28046.25 กรัม แต่ก่อนหน้ามีการเติมน้ำไปแล้ว 4254.02 กรัม และใน
กระดาษมีความชื้น (ปริมาณน้ำ) อยู่แล้ว 9.01 กรัม
เพราะฉะนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเติมจริง $28046.25 - 4254.02 - 9.01 = 23783.22$ กรัม

ปริมาณการใส่สารลดแรงตึงผิว

การใส่สารลดแรงตึงผิวจะใส่ในปริมาณร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งสามารถ
คำนวณปริมาณการใส่ได้จาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม ใช้สารลดแรงตึงผิว 0.3 กรัม ถ้ามีน้ำหนัก
เยื่อแห้ง 224.37 กรัม จะใช้สารลดแรงตึงผิว $\frac{224.37 \times 0.3}{100} = 0.67$ กรัม

แต่มีการเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 5% ดังนั้นปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ต้องเติมจริงจะคำนวณได้จาก สารลดแรงตึงผิว 5 กรัม ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ต้องเติมจริง 100 กรัม ถ้าเติมสารลดแรงตึง 0.67 กรัม เพราะฉะนั้นปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ต้องเติมจริง 13.46 กรัม

ปริมาณการใช้โคโทซาน

การใช้โคโทซานในปริมาณร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

สามารถคำนวณปริมาณการใช้ได้จาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม ใช้โคโทซาน 0.1 กรัม ถ้ามีน้ำหนักเยื่อแห้ง 224.37 กรัม จะใช้โคโทซาน $\frac{224.37 \times 0.1}{100} = 0.22$ กรัม

100

แต่มีการเตรียมโคโทซานความเข้มข้น 1% ดังนั้นปริมาณโคโทซานที่ต้องเติมจริงจะคำนวณได้จาก โคโทซาน 1 กรัม ปริมาณโคโทซานที่ต้องเติมจริง 100 กรัม ถ้าเติมโคโทซาน 0.22 กรัม เพราะฉะนั้นปริมาณโคโทซานที่ต้องเติมจริง 22 กรัม

การใช้โคโทซานในปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

สามารถคำนวณปริมาณการใช้ได้จาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม ใช้โคโทซาน 1 กรัม ถ้ามีน้ำหนักเยื่อแห้ง 224.37 กรัม จะใช้โคโทซาน $\frac{224.37 \times 1}{100} = 2.24$ กรัม

100

แต่มีการเตรียมโคโทซานความเข้มข้น 1% ดังนั้นปริมาณโคโทซานที่ต้องเติมจริงจะคำนวณได้จาก โคโทซาน 1 กรัม ปริมาณโคโทซานที่ต้องเติมจริง 100 กรัม ถ้าเติมโคโทซาน 2.24 กรัม เพราะฉะนั้นปริมาณโคโทซานที่ต้องเติมจริง 224 กรัม

ปริมาณผลผลิตที่ได้

สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักเยื่อที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ} - \text{น้ำหนักหมักที่ถูกกำจัด (reject)} \times 100}{\text{น้ำหนักเยื่อที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ}}$$

ภาคผนวก ข
ข้อมูลดิบของผลการทดลอง

ตารางแสดงผลของไคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

	Chitosan (1) 0.1%			Chitosan (1) 1%			Chitosan (2) 0.1%			Chitosan (2) 1%			Chitosan (3) 0.1%			Chitosan (3) 1%			Acid		
	1	2	ave	1	2	ave	1	2	ave	1	2	ave	1	2	ave	1	2	ave	1	2	ave
Yield	94.00	93.93	<u>93.97</u>	93.95	94.93	<u>94.44</u>	93.99	93.94	<u>93.97</u>	94.01	94.92	<u>94.47</u>	94.26	94.51	<u>94.39</u>	94.05	94.13	<u>94.09</u>	94.37	94.29	<u>94.33</u>
Freeก่อน	374	384	<u>379</u>	411	426	<u>419</u>	393	386	<u>390</u>	404	405	<u>405</u>	398	384	<u>391</u>	399	388	<u>394</u>	400	385	<u>393</u>
Freeหลัง	440	450	<u>445</u>	482	472	<u>477</u>	463	464	<u>464</u>	469	467	<u>468</u>	466	467	<u>467</u>	466	454	<u>460</u>	464	450	<u>457</u>
Denก่อน	0.061	0.061	<u>0.061</u>	0.061	0.061	<u>0.061</u>	0.060	0.060	<u>0.060</u>	0.060	0.060	<u>0.060</u>	0.059	0.060	<u>0.059</u>	0.058	0.059	<u>0.059</u>	0.059	0.060	<u>0.059</u>
Denหลัง	0.063	0.063	<u>0.063</u>	0.063	0.062	<u>0.063</u>	0.061	0.063	<u>0.062</u>	0.061	0.061	<u>0.061</u>	0.061	0.060	<u>0.061</u>	0.060	0.060	<u>0.060</u>	0.059	0.061	<u>0.060</u>
Briก่อน	82.78	81.17	<u>81.98</u>	77.68	75.62	<u>76.65</u>	81.84	83.13	<u>82.49</u>	78.27	77.83	<u>78.05</u>	82.28	83.94	<u>83.11</u>	78.09	79.92	<u>79.00</u>	80.11	82.98	<u>81.54</u>
Briหลัง	87.88	89.32	<u>88.60</u>	83.80	81.72	<u>82.76</u>	89.50	90.73	<u>90.11</u>	84.95	82.24	<u>83.60</u>	89.79	90.32	<u>90.05</u>	85.13	85.47	<u>85.30</u>	91.10	89.36	<u>90.23</u>
Opaก่อน	90.75	91.23	<u>90.99</u>	92.20	92.62	<u>92.41</u>	91.00	90.40	<u>90.70</u>	91.84	92.39	<u>92.11</u>	90.90	90.99	<u>90.94</u>	91.84	92.00	<u>91.92</u>	91.08	90.55	<u>90.82</u>
Opaหลัง	87.56	87.32	<u>87.44</u>	88.79	89.29	<u>89.04</u>	86.85	86.62	<u>86.74</u>	88.09	89.37	<u>88.73</u>	86.84	86.72	<u>86.78</u>	88.08	87.96	<u>88.02</u>	86.35	87.21	<u>86.78</u>
ERICก่อน	134.16	142.26	<u>138.21</u>	137.22	134.04	<u>135.63</u>	141.10	126.62	<u>133.86</u>	149.02	131.10	<u>140.06</u>	133.06	117.80	<u>125.43</u>	129.39	112.31	<u>120.85</u>	149.54	144.43	<u>146.98</u>
ERICหลัง	28.92	26.81	<u>27.86</u>	28.90	30.32	<u>29.61</u>	27.66	26.24	<u>26.95</u>	28.26	30.41	<u>29.34</u>	20.91	21.28	<u>21.09</u>	23.48	19.56	<u>21.52</u>	25.54	28.87	<u>27.21</u>
Tenก่อน	21.84	21.84	<u>21.84</u>	21.21	22.40	<u>21.81</u>	22.58	22.41	<u>22.50</u>	21.88	21.64	<u>21.76</u>	22.20	21.92	<u>22.06</u>	22.17	21.13	<u>21.65</u>	23.42	20.99	<u>22.20</u>
Tenหลัง	25.95	25.74	<u>25.85</u>	25.69	24.85	<u>25.27</u>	25.90	24.79	<u>25.35</u>	26.92	23.64	<u>25.28</u>	25.90	25.72	<u>25.81</u>	26.04	24.72	<u>25.38</u>	26.12	25.88	<u>26.00</u>
Burstก่อน	1.48	1.47	<u>1.48</u>	1.35	1.39	<u>1.37</u>	1.45	1.33	<u>1.39</u>	1.35	1.32	<u>1.33</u>	1.46	1.41	<u>1.43</u>	1.46	1.34	<u>1.40</u>	1.40	1.37	<u>1.39</u>
Burstหลัง	1.54	1.55	<u>1.55</u>	1.59	1.54	<u>1.56</u>	1.56	1.46	<u>1.51</u>	1.67	1.49	<u>1.58</u>	1.57	1.54	<u>1.56</u>	1.59	1.50	<u>1.55</u>	1.57	1.59	<u>1.58</u>
Tearก่อน	5.80	5.72	<u>5.76</u>	5.81	5.94	<u>5.88</u>	5.59	5.30	<u>5.45</u>	5.91	5.56	<u>5.74</u>	5.55	5.77	<u>5.66</u>	5.78	5.73	<u>5.76</u>	5.51	5.58	<u>5.55</u>
Tearหลัง	6.04	5.93	<u>5.99</u>	6.38	6.22	<u>6.30</u>	5.89	5.81	<u>5.85</u>	6.33	5.91	<u>6.12</u>	6.11	6.03	<u>6.07</u>	6.03	5.81	<u>5.92</u>	5.89	5.81	<u>5.85</u>

ภาคผนวก ค
รูปเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 1 เครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation Cell)



รูปที่ 2 เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper)



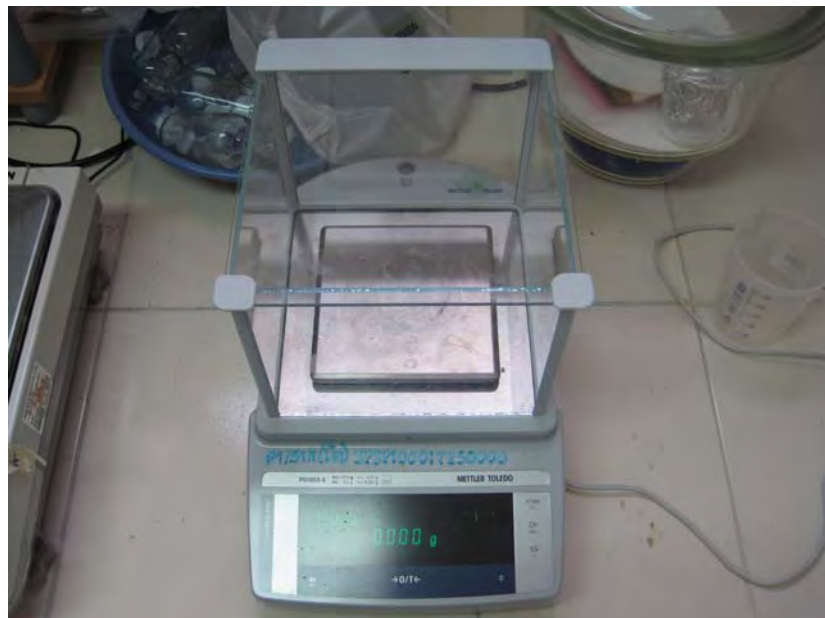
รูปที่ 3 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former)



รูปที่ 4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส



รูปที่ 5 เครื่องย่อยกระดาษ



รูปที่ 6 เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง (Balance)



รูปที่ 7 ตู้อบ (Oven)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นายธนพล ว่องวาณิช เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม 2528 ที่กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา
- ปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมไม้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ปี พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาการจัดการทั่วไป มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
- ปี พ.ศ. 2551 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีเชื้อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิชาการ

ธนพล ว่องวาณิช อนุรักษ์ยาน์ พงศ์สถาปดี สมพร ชัยอารีย์กิจ. ผลของชนิดและปริมาณการใช้ไคโทซานต่อการกำจัดหมึกโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ. การประชุมสัมมนาวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกครั้งที่ 3. วันที่ 20-21 พฤษภาคม พ.ศ. 2553. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จังหวัดชลบุรี